

1 | 2022

**VBio**

Verband | Biologie, Biowissenschaften  
& Biomedizin in Deutschland



**WÜSTEN-  
FORSCHUNG**

Pioniere in der  
Atacama



**KULTUR-  
GESCHICHTE**

Rauschpflanzen  
der Antike



**ANTARKTIS-  
FORSCHUNG**

Artenvielfalt  
in der Tiefsee

# BIOLOGIE

IN UNSERER ZEIT

## Die Gifte der Hundertfüßer



## Wie stark darf sich Wissenschaft in Politik einmischen?



Prof. Dr. Karl-Josef Dietz von der Universität Bielefeld ist seit 2020 Präsident des VBIO.

Liebe Leserinnen und Leser, liebe Mitglieder des VBIO, im Mai 2022 jährt sich die Gründung des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin zum 15. Mal. Der VBIO entstand 2007 nach langer und intensiver Diskussion als Fusion des Verbands Deutscher Biologen und Biowissenschaftlicher Fachgesellschaften e.V. (vdbiol) und des Verbunds Biowissenschaftlicher und Biomedizinischer Gesellschaften e.V. (vbbm). In der 2006 gegründeten Arbeitsgruppe zur Vorbereitung arbeiteten Rudi Balling, Uli Brandt, Hans Dieter Frey, Reinhard Paulsen und ich selbst mit.

Damaliges Ziel war es, eine „gemeinsame und umfassende Vertretung der Biologie und Biowissenschaften“ in Deutschland zu schaffen und Synergieeffekte zwischen allen Interessierten zu entfalten[1]. Die Fusion baute auf der bereits praktizierten gegenseitigen Information und wechselseitigen Bestellung von Vertreter/-innen in die Präsidien von vbbm und vdbiol auf. Aus der Arbeit dieser Arbeitsgruppe entstanden ein konsensfähiger Vorschlag zu offenen Punkten, die *Letters of Intent* beider Partner, die Satzung, der Finanzplan, der Verbandsentwicklungsplan und die Beschlussvorlagen für die Mitgliederversammlungen. Das Studium dieser fast schon historischen Dokumente klärt, wohin die Gründer wollten und wie ihre Vision aussah. Unser Geburtstag ist Anlass, Rückschau zu halten, und ausgehend von unseren Stärken und Möglichkeiten auszuloten, wo Optimierungsmöglichkeiten unseres Einsatzes für biologische Themen liegen. Mit dieser ehrlichen Rückschau wollen wir gezielt zukünftige Handlungsfelder des VBIO in den Blick nehmen.

**Deutlich gestiegene Bedeutung der Biologie.** Die Natur und insbesondere die belebte Umwelt rücken im Zuge der politischen Diskussion über Klimawandel und Nachhaltigkeit in den Fokus einer breiten Öffentlichkeit. Ein Vergleich des Koalitionsvertrags der neuen Ampel-Bundesregierung von 2021 und desjenigen von 2018 belegt diesen Trend. Dabei werden biologische Begriffe wie Natur, Umwelt, Arten, Biodiversität, Tier und Pflanze im neuen Vertrag mit 145 Nennungen nur wenig mehr benutzt als im Vertrag von 2018 mit 136. Sichtbar wird es aber an der Schwerpunktsetzung im beabsichtigten Handeln, wonach ökonomische Entwicklung und ökologische Verantwortung zusammengedacht werden müssen. Wörtlich heißt es: „Der Schutz von Umwelt und Natur ist daher essenzieller Bestandteil unseres politischen Handelns, die 17 Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen (SDG) sind Richtschnur unserer Politik“ [2]. Es ist deshalb absehbar, dass in der kommenden Legislaturperiode der Sachverstand des VBIO für den Bereich der Biologie mehr denn je benötigt werden wird. Gemeinsam mit anderen Wissenschaften trägt die Biologie dazu bei, aktuelle und zukünftige wissenschaftliche, globale wie lokale ökologische, ökonomische und soziale Probleme zu bewältigen. Damit hat sie eine hohe gesellschaftliche Verantwortung und Relevanz. Dies muss deutlich stärker in der Öffentlichkeit kommuniziert und präsent werden.

Der VBIO wird sich daher als die Stimme der Biologie weiterhin bei Verbändeanhörungen zu Gesetzesvorlagen und Verordnungsentwürfen kompetent einbringen. Diese Rolle des VBIO spiegelt sich z. B. wider in unserem fortgesetzten Einsatz für eine praktikable Umsetzung des Nagoya-Protokolls, der Ermöglichung der neuen Züchtungsmethoden, die Kommentierung der Biostoff- und Chemikalienverordnung oder anderer Regularien, die die Arbeitsbedingungen von Biolog/-innen betreffen. Überbordenden Regularien entgegenzuwirken bleibt eine Dauerbaustelle des VBIO.

Ein anderer Schwerpunkt ist die Bildung. Wir werden sowohl ein Augenmerk auf die Rahmenbedingungen für die Forschung und Lehre in den Biowissenschaften legen als auch auf den Stellenwert der Biologie in Schulen. Die nationalen Bildungsstandards im Fach Biologie müssen mit Leben gefüllt werden, d. h. auf ihrer Grundlage müssen lebens- und zukunftsrelevante biologische Erkenntnisse in die Schulcurricula eingebracht werden, um einerseits den biowissenschaftlichen Nachwuchs zu sichern, aber auch über eine vertiefte Bildung im Fach Biologie fundierte Urteile in Entscheidungsprozessen zu ermöglichen. Der VBIO ist sich seiner Verantwortung über die schulischen Curricula hinaus bewusst. Nicht erst seit der Pandemie ist klar, dass eine grundlegende *(Bio-)Scientific Literacy* in der Gesellschaft verankert sein sollte. In den zurückliegenden 15 Jahren hat sich der VBIO als ausgewiesener und anerkannter Akteur und als kompetenter Ansprechpartner auf vielen Ebenen der Gesellschaft und Politik einen Namen erarbeitet.

**Die Vielfalt und Expertise der Mitglieder sind die Stärke des VBIO.** Fundierte Fach- und Sachkenntnis ist die Voraussetzung für erfolgreiche Aktivität. Sie gelingt durch die Einbindung vielfältiger Expertisen unserer wissenschaftlichen Fachgesellschaften, Einzelmitglieder und Landesverbände, Arbeitskreise, Projektgruppen und in Zukunft der neu eingerichteten Ständigen Ausschüsse als informelle Arbeitsgremien. Dadurch kann der VBIO seine Funktion als Meinungsbildner, Ansprechpartner und Ratgeber vor allem bei Querschnittsthemen der Biologie und Biomedizin erfüllen und auf einen breiten Pool an Kenntnissen zurückgreifen. Unsere Akteure speisen ihre zeitlichen Ressourcen auf ehrenamtlicher Basis ein, und da wünschen wir uns weitere Unterstützung. Wir freuen uns über jedes zusätzliche Engagement, um noch stärker für die gemeinsame Sache eintreten zu können.

**Der VBIO im Gestaltungsprozess der Gesellschaft.** In der letzten Zeit wurde ich vermehrt in interessante Diskussionen zum Selbstverständnis der Wissenschaft involviert. Die Frage wurde gestellt, ob Wissenschaftler/-innen jenseits der Beschreibung wissenschaftlicher Fakten Lobbying betreiben dürfen? Verlieren sie durch die Vertretung ihrer (beruflichen) Interessen an Glaubwürdigkeit? Steht ihnen nur zu, bspw. die Biodiversität zu beschreiben

und auf deren Funktionalitäten in den Systemebenen hinzuweisen, oder dürfen sie als Wissenschaftler/-innen den Erhalt der Artenvielfalt und die bessere Ausstattung der wissenschaftlichen Einrichtungen einfordern? Oder nur als Privatperson? Die Entscheidung über den Wert der Biodiversität läge ausschließlich bei der Gesellschaft und den politischen Vertretern. Sie besäßen das normative Primat. Ähnliche Diskussionen zur Stellung der Wissenschaft ergeben sich im Zuge der COVID-19-Pandemie.

Eine solche prinzipielle Trennung geht meines Erachtens zu weit, und ich nehme an, dass eine Mehrheit von Ihnen meine Meinung teilt. Wissenschaftler/-innen sollen sich positionieren, wobei erkennbar sein muss, wenn Fakten gemäß aktuellem wissenschaftlichem Kenntnisstand oder Meinungen und abgeleitete Ratschläge formuliert werden. Niemand wird bestreiten, dass das Einholen von Expertenwissen in immer komplexer werdenden Zusammenhängen unabdingbar notwendig ist. Ebenso wichtig ist der Perspektivwechsel, das aktive Aufnehmen und Verarbeiten anderer Meinungen, bevor man zu eigenen Schlussfolgerungen kommt. Und ist hier nicht gerade die Meinung eines Experten/einer Expertin auf seinem/ihrer Gebiet besonders hörensenswert?

Es ist die satzungsgemäße Aufgabe des VBIO als Verband, diese evidenzbasierte Beratungsfunktion zu erfüllen. Deshalb benötigen wir auch in Zukunft einen starken VBIO als Sprachrohr für unsere gemeinsamen Interessen. Und an dieser Stelle möchte ich Sie als Leser/-innen direkt ansprechen: Ihre Mitgliedschaft im VBIO als Fachgesellschaften, individuelle Mitglieder und kooperierende Mitglieder stärkt die Stimme der Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin. Ihr Mitgliedsbeitrag trägt dazu bei, die gemeinnützige Arbeit des VBIO zu finanzieren. Dadurch fördern Sie die Biowissenschaften im beschriebenen Sinne und als inspirierendes und attraktives Betätigungsfeld für zukünftige Generationen. Neue Mitglieder zu gewinnen ist für uns wichtig, um die Vielfalt der Biologie für Studierende, aber auch für Berufstätige in vielfältigen Berufsfeldern und andere Biologieinteressierte abzubilden und eine nachhaltige Mitgliederstruktur zu erhalten. Deshalb bitte ich Sie mit Kolleg/-innen, aber ebenso in Ihrem Freundeskreis über die Arbeit und Erfolge des VBIO zu sprechen. Wir müssen unsere Bekanntheit und den VBIO als Marke weiter stärken und neue Mitglieder gewinnen, um weiterhin eine öffentlichkeitswirksame Stimme zu sein, die von der Politik gehört wird.

**Der VBIO als Akteur im Feld der mathematisch-naturwissenschaftlichen Fächer.** Viele Fragen zum wissenschaftlichen Umfeld betreffen nicht nur die Biologie, sondern in gleicher Weise andere naturwissenschaftliche Fächer und die Mathematik. Seit Jahren treffen sich regelmäßig die Präsidien des DVGeo (Geowissenschaften), der DMV (Mathematik), der DPG (Physik), der GDCh (Chemie) und des VBIO. Gemeinsam erkennen wir schneller Handlungsfelder und erhöhen unser politisches Gewicht. Beispiele unserer Zusammenarbeit waren die Wahlprüfsteine 2021, die an die im vorigen Bundestag vertretenen Parteien geschickt wurden, die Planung des Pandemie-bedingt nun ins kommende Jahr verschobenen Parlamentarischen Abend zum Thema „Klima und Energie“ in Berlin, Abstimmungen zum Wissenschaftszeitvertragsgesetz oder

der Umgang mit *Hate Speeches* gegen Wissenschaftler/-innen. Hier bringt der VBIO seine fachspezifischen Sichtweisen in die Debatte, in gemeinsame Arbeitspapiere und Aktivitäten ein und profitiert von der starken Expertise der anderen Gesellschaften. Diese erfreuliche Interaktion passt ideal zum Leitbild und Auftrag des VBIO.

**Die VBIO-Perspektiven für 2022.** Für das kommende Jahr haben wir uns neben den laufenden Aktivitäten besondere Schwerpunkte vorgenommen. So wollen wir die Zusammenarbeit mit unseren Mitglieds-Fachgesellschaften, der Konferenz Biologischer Fachbereiche und der Bundesfachschaften-Tagung Biologie intensivieren. Die Vereinten Nationen haben jüngst das *International Year of Basic Science for Sustainable Development* (IYBSSD) proklamiert, das im Zeitraum vom 1. Juli 2022 bis zum 30. Juni 2023 die Bedeutung der Grundlagenforschung bei der Bewältigung der Herausforderungen zum Klimawandel und zum Erreichen von Nachhaltigkeitszielen herausstellen wird. Hier ist neben Expertise vor allem auch Ideenreichtum nötig – eine doppelte Herausforderung, der sich der VBIO gerne stellt.

Zu Beginn des Jahres 2021 hat der VBIO erfolgreich die Verbandszeitschrift „Biologie in unserer Zeit“ – die *BiuZ* – übernommen, die auch zukünftig über den Tellerrand unserer Mitglieder hinaus nach außen wirken soll. Ihre Kommentare zeigen, dass sich unsere Anstrengung lohnt. Unsere Managing Editorin Larissa Tetsch, unser Chief Editor Wolfgang Nellen und der Ständige Ausschuss zum Publikationswesen des VBIO arbeiten an der Weiterentwicklung des *BiuZ*-Konzepts. Wir freuen uns – das ist nicht daher gesagt – über jedes Feedback zu Fachartikeln oder politisch-wissenschaftlichen Beiträgen.

Auch das kommende Jahr 2022 verspricht somit herausfordernd und arbeitsintensiv zu werden. Alle Akteure des VBIO werden sich für die Belange der Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in gewohnter Weise einsetzen und hoffen auf Ihre Mithilfe und Ihr Feedback, frei dem Zitat folgend: „Ich bin überzeugt, dass wir die Zukunft auch weiterhin gut gestalten können, wenn wir uns nicht mit Missmut, mit Missgunst, mit Pessimismus, sondern ... mit Fröhlichkeit im Herzen an die Arbeit machen“ [3].

### Literatur

- [1] R. Balling, R. Paulsen (2007). Es ist soweit: VBIO in den Startlöchern, *BIOspektrum* 13, 119.
- [2] Mehr Fortschritt wagen – Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Koalitionsvertrag 2021–2025 zwischen SPD, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN und FDP, [www.spd.de/koalitionsvertrag2021](http://www.spd.de/koalitionsvertrag2021)
- [3] [www.bundesregierung.de/breg-de/suche/rede-von-bundeschkanzlerin-merkel-anlaesslich-des-grossen-zapfenstreichs-am-2-dezember-2021-in-berlin-1987276](http://www.bundesregierung.de/breg-de/suche/rede-von-bundeschkanzlerin-merkel-anlaesslich-des-grossen-zapfenstreichs-am-2-dezember-2021-in-berlin-1987276)

Ihr





Biologie in unserer Zeit ist die Verbandszeitschrift des Verbandes Biologie, Biowissenschaften & Biomedizin in Deutschland – VBIO e.V. Mehr Informationen finden Sie im Internet unter [www.vbio.de](http://www.vbio.de).

**Verlag:**

Verband Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland – VBIO e.V.  
Corneliusstr. 12, 80469 München  
Telefon +49 (0)89/26 02 45 73  
Email: [biuz@vbio.de](mailto:biuz@vbio.de)

Alleinvertretungsberechtigter Vorstand:  
Prof. Dr. Karl-Josef Dietz, Bielefeld (Präsident)  
PD Dr. Christian Lindermayr, Friedberg (Schatzmeister)

**Managing Editor:**

Dr. Larissa Tetsch (verantwortlich für den Inhalt),  
Steinröselweg 9, 82216 Maisach;  
Telefon +49 (0)81 41/8 88 06 27  
Email: [redaktion@biuz.de](mailto:redaktion@biuz.de)

**Editorial Board:**

Erwin Beck, Bayreuth  
Ralf Dahm, Mainz  
Harald Engelhardt, Martinsried  
Jacob Engelmann, Bielefeld  
Monika Hassel, Marburg  
Christian Körner, Basel  
Wolfgang Nellen, Kassel (Chief Editor)  
Hannes Petrischak, Wustermark  
Felicitas Pfeifer, Darmstadt  
Michael Riffel, Hirschberg  
Udo Schumacher, Hamburg  
Marco Thines, Frankfurt

**Herstellung:**

Dr. Larissa Tetsch,  
Telefon +49 (0)81 41/8 88 06 27  
Email: [redaktion@biuz.de](mailto:redaktion@biuz.de)

**Anzeigenleitung:**

Dr. Carsten Roller, Corneliusstr. 12, 80469 München  
Telefon +49(0)89/26 02 45 73  
Email: [roller@vbio.de](mailto:roller@vbio.de)

**Mitglieder- und Abo-Service:**

VBIO e.V., Geschäftsstelle München,  
Corneliusstr. 12, 80469 München  
Telefon +49(0)89/26 02 45 73 - Fax +49(0)89/26 02 45 74  
Email: [mitgliederservice@vbio.de](mailto:mitgliederservice@vbio.de)

**Preise:**

Bibliotheken und Organisationen: Bitte Rückfrage  
Bei VBIO-Mitgliedschaft inklusiv  
<https://vbio.de/beitritt>

**Geschäftsstellen des Verbandes:**

**Geschäftsstelle München**

Dr. Carsten Roller, Corneliusstraße 12, 80469 München  
Telefon +49(0)89/26 02 45 73, [info@vbio.de](mailto:info@vbio.de)

**Geschäftsstelle Berlin**

Dr. Kerstin Elbing, Luisenstraße 58/59, 10117 Berlin,  
Telefon +49(0)30/27 89 19 16, [elbing@vbio.de](mailto:elbing@vbio.de)

**Satz:**

TypoDesign Hecker GmbH, Leimen.

**Druck und Bindung:**

ColorDruck Solutions GmbH, Leimen.

© VBIO e.V., München, 2022.

Printed in the Federal Republic of Germany.  
ISSN 0045-205 X

# BIOLOGIE

1 | 2022 IN UNSERER ZEIT  
[www.biuz.de](http://www.biuz.de)



Der Gemeine Steinläufer (*Lithobius forficatus*) ist ein in Europa weit verbreiteter Gartennützling und mit gut drei Zentimetern die größte Art in der Gattung. Das abgebildete Exemplar wurde in Hither Green (London) gesammelt, um das Gift der Art zu studieren. Die nachtaktiven Tiere halten sich oft unter Rinde, Steinen und in Totholz in fast jedem Biotop auf. Ihr Biss ist durch die großen Kieferklauen für Menschen durchaus schmerzhaft. Das zur Jagd diverser wirbelloser Arten wie Spinnen und Insekten hoch effektive Gift ist für Menschen aber harmlos. Wie die unerwartet diversen Gifte der Hunderfüßer entstanden sind, erfahren Sie auf Seite 38. Foto: Björn von Reumont.

## MELDUNGEN

6 Forschung & Entwicklung, Digitale Welt, Veranstaltungen, Preise, Ausstellung

## POLITIK UND GESELLSCHAFT

- 11 Bundesdelegiertenversammlung des VBIO fand erneut online statt
- 12 Befristung am Scheidepunkt
- 15 Perspektiven für Fachgesellschaften
- 16 Mikrobiologie in Alltag und Forschung

## TREFFPUNKT FORSCHUNG

- 18 Somatosensorik und Ionenkanäle
- 19 Salzkrebschen der Gattung *Artemia*: Who's who?
- 21 Milane: Stabile Bestände bei Langzeitmonitoring in Westpolen
- 22 Wiederkäuer: Klima-Killer oder faszinierende Spezies?
- 25 Über den Spessart hinaus von Bedeutung
- 27 Museen und Zoos zu Hause erleben?

## MAGAZIN

- 89 Bücher und Medien
- 92 Mikroben verstehen: Polyploidie bei Mikroben
- 94 Außerschulische Lernorte: Naturkundemuseum Berlin – Gemeinsam für Natur
- 96 Partner des Menschen: Die Forelle
- 98 Kolumne: Der IKEA-Effekt

IM FOKUS

- 29** Gift- und Rauschpflanzen in der frühen Antike  
Michael Wink
- 38** Die unerwartet diversen Gifte der Hundertfüßer  
Björn M. von Reumont | Nikolaus Szucsich | Andy Sombke
- 47** Große Artenvielfalt im Südpolarmeer  
Gritta Veit-Köhler | Dorte Janussen | Angelika Brandt
- 58** Die Grüne Wüste Südamerikas?  
Karen Baumann | Patrick Jung | Lukas W. Lehnert |  
Elena Samolov | Christel Baum | Jörg Bendix | Ulf Karsten |  
Burkhard Büdel | Peter Leinweber
- 66** 100 Jahre Forschung an Wanderheuschrecken  
Hans-Joachim Pflüger | Peter Bräunig
- 72** Bakterielle Sensorenkomplexe zur Umweltnavigation  
Ariane Briegel
- 80** Biologieunterricht praktisch und digital  
Marcel Bonorden | Kai Meinders | Sascha Offermann |  
Anja Riemenschneider | Jutta Papenbrock

**38** Die unerwartet diversen Gifte der Hundertfüßer



Hundertfüßer verfügen über ein vielfältigeres Arsenal an Giften, als bisher bekannt war. Ein Grund hierfür ist vermutlich die Anpassung des Giftapparates an sehr unterschiedliche Lebensweisen und Beutetiere. Unser Artikel beleuchtet, wie diese Giftvielfalt entstanden ist.

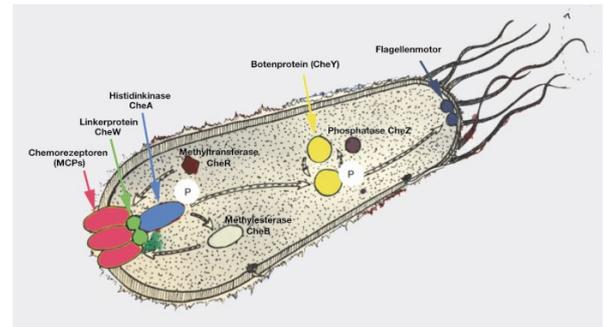
**66** 100 Jahre Forschung an Wanderheuschrecken



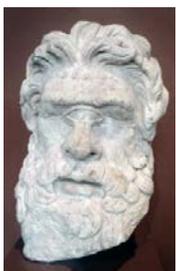
Schwärme von Wanderheuschrecken können riesige Areale verwüsten und lassen sich nur durch großflächig eingesetzte Insektizide bekämpfen. Ihre Entstehung zu erforschen ist ein wichtiger Beitrag zur Verbesserung der Lebensgrundlagen von Millionen von Menschen.

**72** Bakterielle Sensorenkomplexe zur Umweltnavigation

Viele Bakterien können Nährstoffgradienten wahrnehmen und ihren Bewegungsapparat danach ausrichten. Dabei helfen ihnen ausgedehnte Gitter aus Sensorenkomplexen. Diese als Chemotaxis bekannte Fähigkeit spielt auch im Infektionsgeschehen eine wichtige Rolle.



**29** Gift- und Rauschpflanzen in der frühen Antike

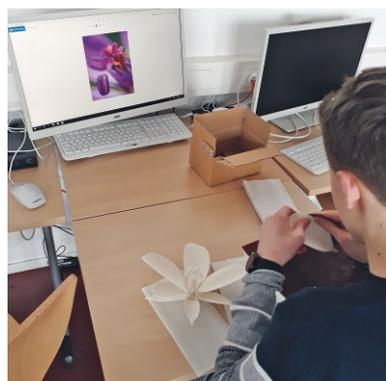


Um Krankheiten und Naturphänomene zu verstehen, suchten die Menschen der Antike Zuflucht in Mythen und Göttergeschichten. Mit unserem heutigen Wissen über Gift- und Rauschpflanzen können wir manches vermeintlich übernatürliche Phänomen erklären.

**47** Große Artenvielfalt im Südpolarmeer



Die Tiefsee ist nicht nur der größte Lebensraum auf unserer Erde, sondern auch der am wenigsten bekannte. Im Südozean überrascht uns die Tierwelt immer wieder mit unbekanntem Arten, besonderen Anpassungen und einer Diversität, die ihresgleichen sucht.



**80** Biologieunterricht praktisch und digital

Die Digitalisierung des Unterrichts erfordert von Lehrkräften ein hohes Maß an technischer Kompetenz. Unsere Autoren stellen ein Konzept vor, mit dem computergestützte Modellierung und 3D-Druck gewinnbringend in den Unterricht integriert werden können.

**58** Die grüne Wüste Südamerikas?



Pionierorganismen wie Cyanobakterien, Grünalgen und Flechten können selbst in Wüsten Fuß fassen. Ihre Strategien um in der Atacama an das benötigte Wasser und ausreichend Nährstoffe zu kommen, stellen unsere Autoren vor.

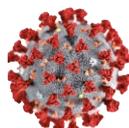


**Monarchfalter sind berühmt für ihre jährliche Langstreckenwanderung, die sie in großen Schwärmen über mehrere tausend Kilometer vom Norden der USA bis zu ihrem Winterquartier nach Zentralmexiko führt. Auf ihrer Wanderung orientieren sich die auffällig orange-schwarz-weiß gezeichneten Schmetterlinge an der Sonne. Hier machen sie Rast auf einem Baum in Kalifornien. Foto: iStock.**

## FORSCHUNG & ENTWICKLUNG

Bislang ging die Forschung davon aus, dass der Sonnenkompass der Monarchfalter unabhängig von der eigenen Bewegung funktioniert. Ein Team um die Würzburger Forscher Jerome Beetz und Basil el Jundi zeigt nun, dass sich der Kompass erst beim Fliegen ausbildet. „Erstaunlicherweise ändern die Nervenzellen während des Fluges ihre Verarbeitungsstrategie, so dass das Nervennetzwerk ähnlich wie ein Kompass die Wanderrichtung der Falter relativ zur Sonne anzeigt“, erklärt Beetz. Durch **erstmalige Messungen von Nervenaktivität bei fliegenden Monarchfaltern** konnten die Forscher zeigen, dass eine aktive Bewegung der Falter nötig ist, damit ihr Gehirn die Sonneninformation in einem internen Kompass auf der Wanderung verarbeiten kann. „Unsere Publikation zeigt auf einzigartige Weise, dass selbst ein Gehirn von der Größe eines Reiskorns ein hoch komplexes Organ ist, das es den Insekten ermöglicht, solche erstaunlichen Fähigkeiten zu besitzen. Mit seiner Hilfe schaffen es die Monarchfalter, die enorme Wanderung mit einem effizienten inneren Kompass zu bewerkstelligen. Eine solche Leistung ohne moderne Navigationsgeräte ist für uns Menschen schwer nachvollziehbar und ein Grund für meine Faszination für diese Schmetterlinge“, so Beetz. Als nächstes wollen die Würzburger untersuchen, wie der Sonnenkompass der Falter funktioniert, wenn sie statt eines Lichtpunkts im Experiment den natürlichen Himmel sehen können. Dazu müssen die Messungen der Nervenaktivität an Flugsimulatoren im Freien durchgeführt werden. [www.uni-wuerzburg.de](http://www.uni-wuerzburg.de)

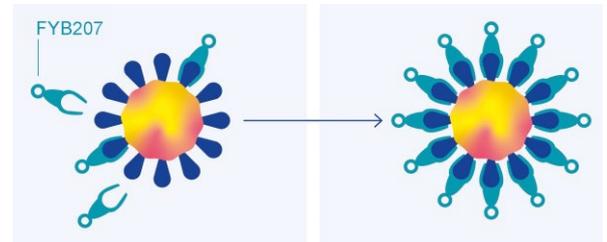
■ Dank einer bisher einzigartigen weltweiten Zusammenarbeit gab es sehr schnell Impfstoffe gegen das SARS-CoV-2-Virus. Bei der Entwicklung von Medikamenten



gegen Covid-19 gab es bisher aber nur Teilerfolge. Die bisher wirksamste medikamentöse Therapie, die wir gegen SARS-CoV-2 in der Hand haben, ist die Gabe von rekombinanten Antikörpern, die jedoch aufgrund von Mutationen im Viruserbgut oft ihre Wirksamkeit verlieren. Eine andere Strategie verfolgt ein Team aus Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern der Technischen Universität München, der Ludwig-Maximilians-Universität München, von Helmholtz Munich und der Münchener Formycon AG: Sie haben das ACE2-Protein, das von SARS-CoV-2 als Eintrittspforte in die Wirtszellen genutzt wird, mit einem Teil eines menschlichen Antikörperproteins verbunden. Dadurch entstand ein Wirkstoff, der das Spike-Protein des Virus blockiert, das normalerweise an ACE2 bindet. In Zellkulturversuchen **konnte dieser Wirkstoff das Virus einschließlich der Varianten Alpha, Beta und Delta komplett neutralisieren** und eine Infektion verhindern. Versuche mit der neuen Omikron-Variante starten gerade. „Vor dem Hintergrund zukünftiger, möglicherweise noch ansteckenderer Varianten brauchen wir neben der Impfung auch einen breit wirksamen Wirkstoff gegen dieses Virus“, sagt Ulrike Protzer, Leiterin des Instituts für Virologie der TU München und bei Helmholtz Munich.

[www.tum.de](http://www.tum.de)

■ Kakaoanbau erlaubt uns nicht nur den Genuss von Schokolade, sondern kann auch die Artenvielfalt fördern. Die Vorteile der Farmen für die biologische Vielfalt wurden in Agrarlandschaften mit Resten von tropischen Regenwäldern umfassend untersucht, waren aber in Regionen mit tropischen Trockenwäldern bisher unbekannt. Ein internationales Forschungsteam unter Leitung der Universität Göttingen hat nun erstmals herausgefunden, dass Vögel und Fledermäuse von Kakaoanbau unter Schattenbäumen profitieren. In solchen Kakao-Agro-



**Indem es die Spike-Proteine des Virus blockiert, verhindert das Fusionsprotein FYB27 das Eindringen des Virus in Zellen und unterdrückt damit seine weitere Vermehrung.** Abb.: Formycon AG.

forstsystemen **waren Fledermäuse stets in größeren Gruppen anzutreffen als in den umliegenden Wäldern.** Bei Vögeln war dies nur in der Trockenzeit der Fall. „Kakao-Agroforstsysteme scheinen eine Oase für Vögel zu sein, die ihnen Nahrung und Lebensraum bietet, wenn Nahrung im Wald knapp ist“, erklärt Co-Autor Prof. Dr. Teja Tscharntke, Leiter der Abteilung Agrarökologie der Universität Göttingen. „Dies hat wichtige Konsequenzen für die Ökosystemleistungen in Agroforstsystemen, da Vögel und Fledermäuse eine wichtige Rolle bei der Bekämpfung von Insektenschädlingen im Kakao spielen“, ergänzt Co-Autorin Dr. Bea Maas von der Universität Wien. [www.uni-goettingen.de](http://www.uni-goettingen.de)

■ Ein zentrales Rätsel der Evolutionsbiologie ist, wie komplexe Neuheiten scheinbar aus dem Nichts entstehen können. Neue Einblicke in dieses Rätsel lieferten nun Süßwasserfische aus dem Hochland der indonesischen Insel Sulawesi. Im Gegensatz zu den meisten Fischen überlassen bauch-

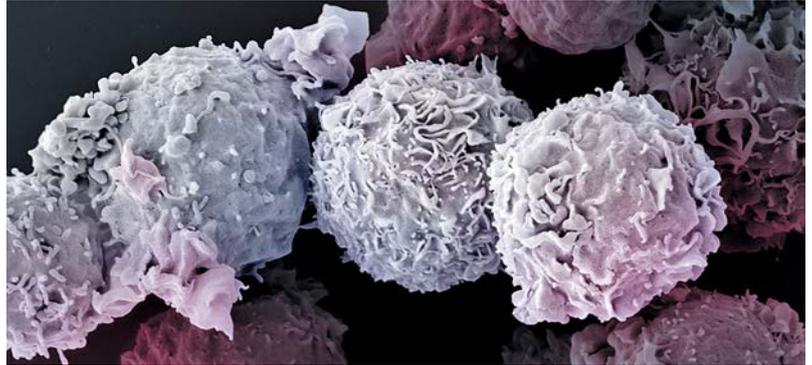


**Eine insektenfressende Fledermaus in Kakaowäldern in Peru.** Foto: Jean-Pierre Castro-Namuche.

Für die Richtigkeit der Informationen sind die jeweils genannten Institutionen verantwortlich.

brütende Reisfische ihre Eier nicht einfach ihrem Schicksal. Stattdessen tragen sie ihren Nachwuchs gut behütet auf den Bauchflossen mit sich herum. Ermöglicht wird diese erstaunliche Fortpflanzungsstrategie durch ein einzigartiges Gewebe, den sogenannten Plug. Er bildet sich nach jeder Paarung im Mutterleib und verankert dort dünne Schnüre, sogenannte Filamente, an denen die Eier hängen. Forschende des Leibniz-Instituts zur Analyse des Biodiversitätswandels fanden jetzt einen Beleg dafür, dass wiederholte **Entzündungen im Fortpflanzungstrakt in Folge von Verletzungen zur Entstehung des Plugs beigetragen haben**. „Als die Vorfahren der heutigen Bauchbrüter begannen, ihre Eier immer länger mit sich zu tragen, verursachten die Filamente nach jeder Paarung winzige Verletzungen im Fortpflanzungstrakt,“ führt Dr. Leon Hilgers, der Erstautor der Studie aus. Entzündungen regen die Zellteilung an, lassen Immunzellen einwandern und Blutgefäße sprießen. Damit kontrollieren sie viele Prozesse, die nicht nur der Wundheilung, sondern auch dazu dienen können, ein neues Gewebe wie den Plug aufzubauen. Dabei lassen sich Parallelen zwischen bauchbrütenden Reisfischen und der Schwangerschaft bei uns Menschen ziehen, denn eine abgewandelte Entzündungsreaktion liegt auch der Evolution der Embryoneinnistung in der Gebärmutter der Säugetiere zugrunde.

<https://leibniz-lib.de>



**Coronin-1 sorgt dafür, dass die T-Zellen unseres Immunsystems – hier in einer elektronenmikroskopischen Aufnahme – lange Zeit überleben.**

Abb.: Nano Imaging Lab SNI/Biozentrum, Universität Basel.

Sie stehen im Kampf gegen Viren, Bakterien und entartete Zellen an vorderster Front: die T-Zellen unseres Immunsystems. Doch je älter wir werden, desto weniger T-Zellen produziert unser Körper. Wie lange wir gesund bleiben, hängt also auch davon ab, wie lange unsere T-Zellen überleben. Gemeinsam mit Forschenden des Departements Biomedizin und sciCORE der Universität Basel hat die Forschungsgruppe von Prof. Dr. Jean Pieters am Biozentrum nun einen bislang unentdeckten Signalweg gefunden, der den T-Zellen zu einem langen Leben verhilft. Wichtigster Akteur dabei ist das Protein Coronin-1. Um diesen Signalweg zu finden, entwickelten die Forschenden zunächst eine Methode, mit der sie sehr reine T-Zellenpopulationen gewinnen konnten. Anschließend analysierten sie die Gesamtheit der RNA-Moleküle sowohl in normalen als auch in Zellen mit Coronin-1-Mangel. Die Analyse er-

gab, dass **Coronin-1 die Lebensdauer von T-Zellen über einen Signalweg steuert**, der die Zusammensetzung der Zellmembran überwacht. Dabei unterdrückt Coronin-1 über das Enzym PI3Kdelta den Zelltod. „Angesichts der Bedeutung von T-Zellen bei so unterschiedlichen Prozessen wie der Abwehr von viralen oder bakteriellen Krankheitserregern, der Entstehung von Krebs und Autoimmunität könnte die Arbeit einen wertvollen Beitrag leisten, um sowohl erwünschte als auch unerwünschte T-Zell-Aktivitäten besser zu kontrollieren“, so Pieters.

[www.unibas.ch](http://www.unibas.ch)



## DIGITALE WELT

Mit dem Onlineportal und der App „BODENTIER hoch 4“ möchte das Senckenberg Museum für Naturkunde Görlitz Menschen verschiedenster Altersgruppen die heimischen Bodentiere Doppelfüßer (Diplopoda), Hundertfüßer (Chilopoda) und Landasseln (Oniscidea) näher bringen und sie motivieren, selbst an der Erforschung der biologischen Vielfalt des Bodens mitzuwirken. Für die rund 260 Arten wurden **benutzungsfreundliche interaktive Bestimmungsschlüssel für Browser und Smartphone** entwickelt. In Steckbriefen können sich die Nutzer/-innen z. B. mit Verbreitung, Ökologie, Merkmalen und Aussehen dieser in der Öffentlichkeit wenig bekannt-

Ein brütendes Weibchen der Reisfischart *Oryzias eversi*.

Foto: Leon Hilgers.



ten Tiergruppen vertraut machen. Durch die Übermittlung von Fundmeldungen werden die Nutzer/-innen zu Bürgerwissenschaftler/-innen und können aktiv an der Erforschung der Bodentiere mitwirken. <https://bodentierbochvier.de/>



**Bodentiere richtig bestimmen mit dem Online-Portal BODENTIER hoch 4.** Foto: E. Iorio, J. Rosenberg, D. Carrascal/Dindin, CC BY 4.0.

## VERANSTALTUNGEN

Der BundesUmweltWettbewerb (BUW) richtet sich an Jugendliche und junge Erwachsene im Alter zwischen 10 und 20 Jahren. Gemäß dem Wettbewerbsmotto „**Vom Wissen zum nachhaltigen Handeln**“ sollen umweltinteressierte Teilnehmende Ursachen und Zusammenhänge von Umweltproblemen erkennen, nachhaltige Problemlösungen finden und diese im Rahmen ihrer Möglichkeiten auch in die Tat umsetzen. Diese



Handlungsorientierung ist das Hauptmerkmal des BUW und ist im Vergleich zu anderen Wettbewerben derzeit einzigartig. Die Umweltprobleme und die entsprechenden Lösungen oder Lösungsansätze, die schriftlich in einer Projektarbeit verfasst und beim BUW eingereicht werden, sollten dabei möglichst Bezug zum Lebens- und Erfahrungsbereich der Teilnehmenden aufweisen. Neben Urkunden gibt es Geld- und Sachpreise für die verschiedenen Haupt-, Sonder-, Förder- und Anerkennungspreise im Gesamtwert von über 25.000 Euro zu gewinnen. Des Weiteren werden ausgewählte Preisträgerinnen und Preisträger zum Auswahlverfahren der Studienstiftung des deutschen Volkes vorgeschlagen. Die Anmeldung zum BUW und die Einreichung der Projektarbeit erfolgt online bis zum 15. März 2022.

[www.bundesumweltwettbewerb.de](http://www.bundesumweltwettbewerb.de)

Invasive und gebietsfremde Arten breiten sich zunehmend aus und bedrohen dabei nicht nur andere Arten oder deren Lebensräume, sondern haben auch Auswirkungen auf die Wirtschaft und die Gesundheit der Bevölkerung. Das Unabhängige Institut für Umweltfragen (UFU) will zusammen mit dem Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) sowie dem Verein Wildlife Detection Dogs e. V. durch die Einbeziehung von zu schulenden Hunden und deren Halter/-innen die **Informationsbasis zur Verbreitung von invasiven gebietsfremden Arten verbessern**.

Das Projekt hat eine Laufzeit von April 2021 bis September 2024 und wird im Rahmen des Förderbereichs Bürgerforschung vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert. Wildlife Detection Dogs übernimmt die Vorbereitung der Ausbildungsinhalte und koordiniert die Anleitung der Hundehalter durch erfahrene Trainer sowie die Organisation und Durchführung der Trainingskurse inklusive einer Evaluierung der einzelnen Mensch-Hund-Teams. [www.ufu.de/projekt/igamon-dog/](http://www.ufu.de/projekt/igamon-dog/)



**Einsatz von Hunden zum Artnachweis.**  
Foto: Wildlife Detection Dogs e.V.

## PREISE

Vom 23. August bis zum 15. Oktober 2021 hatten die Deutsche Raumfahrtagentur im DLR und die Luxembourg Space Agency (LSA) im Rahmen des Überflieger-2-Wettbewerbs Studierende dazu aufgerufen, **Ideen für eigene Experimente auf der Internationalen Raumstation ISS** einzureichen. Drei der Gewinner kommen aus dem Bereich der Lebenswissenschaften: ADDONISS von der TU München, BRAINS von der University of Luxembourg und Glücksklee von der Leibniz Universität Hannover. ADDONISS (Ageing and Degenerative Diseases of Neurons on the ISS) macht sich zunutze, dass viele Alterungsprozesse im Weltraum beschleunigt ablaufen, um mehr über degenerative Erkrankungen des Gehirns wie etwa Alzheimer zu lernen.



BRAINS möchte in der Schwerelosigkeit an Bord der ISS weniger dichte und größere Organoiden als auf der Erde heranwachsen lassen, die zur Erforschung von Krankheiten und der Wirksamkeit von Medikamenten genutzt werden können.

Glücksklee beschäftigt sich mit der Möglichkeit, Nahrungspflanzen im All anzubauen. Dazu wird die symbiotische Beziehung von Klee (*Medicago truncatula*) und in der Erde lebenden Bakterien (*Sinorhizobium meliloti*) in der Schwerelosigkeit erforscht. Die Experimente

reisen Ende 2022 oder Anfang 2023 an Bord einer Trägerrakete zur ISS und werden dort 30 Tage lang autonom betrieben.

[www.dlr.de](http://www.dlr.de)

## AUSSTELLUNG

Die virtuelle Kunstausstellung „Science meets Art“ zeigt ab 1. November 2021 die **künstlerischen Talente von Menschen aus den Ozeanwissenschaften**. Es handelt sich dabei um eine Kooperation zwischen dem GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel und den drei Ozeanprojekten CUSCO, EVAR und REEBUS. Die gesamte Belegschaft des GEOMAR, von Wissenschaft bis Verwaltung, wurde dazu aufgerufen, ihrer Kreativität eine Bühne zu geben und ihre Kunst für die Online-Ausstellung einzureichen. Aus den mehr als 20 hochwer-



**Steinkoralle aus „Science meets Art“, Dr. Angela Stevenson, GEOMAR.**

tigen Beiträgen wurde eine Auswahl getroffen und in einer Online-Ausstellung visualisiert. Die Themen der Ausstellungsobjekte wurden dabei frei gewählt. „Science meets Art“ zeigt auf faszinierender Weise, dass Kunst, Kreativität und Wissenschaft keine Gegensätze sind, sondern sich gegenseitig befruchten.

Gezeigt werden Werke der Aquarell- und Ölmalerei, Forschungsschiff-Modellbau, Astrofotografie, Tierskizzen und vieles mehr. Die virtuelle Ausstellung kann online kostenfrei besucht werden.

<https://geomar.pageflow.io/science-meets-art>

## PREISGEKRÖNTE ORGANISMEN

Eine im Verborgenen heimischer Moore lebende Alge namens *Stylodinium* haben Forschende der Sektion Phykologie der Deutschen Botanischen Gesellschaft (DBG) zur **Alge des Jahres 2022** gewählt. Der einzellige Panzergeißler (Dinophyta) heftet sich an andere Algen an, auch wenn er eigentlich selbst schwimmen kann, und gibt damit Rätsel auf. Doch *Stylodinium* droht gemeinsam mit seinem Lebensraum zu verschwinden, noch bevor seine den Aufsitzerpflanzen im Regenwald ähnliche Lebensweise erforscht ist. Die Stielalge hilft außerdem bei der Erkennung ökologisch intakter Moorgewässer. Sie kann der Biodiversitäts- und Klimaforschung dienen, wenn ihre Arten zweifelsfrei bestimmbar werden. Daran arbeiten Teams um Prof. Dr. Marc Gottschling von der Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU) und Dr. Urban Tillmann vom Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven. [www.dbg-phykologie.de](http://www.dbg-phykologie.de)



**Die kugelförmige Alge *Stylodinium* cf. *bavariense* aus den ehemaligen Torfstichen nahe des bayerischen Seeon heftet sich mit einem Stiel an eine fadenförmige Alge, nachdem sie ihr schwimmendes Stadium aufgegeben hat.** Lichtmikroskopische Aufnahme: Corinna Romeikat (LMU).



**Die Schwarzhalsige Kamelhalsfliege (*Venustoraphidia nigricollis*).** Foto: Harald Bruckner.

Die Schwarzhalsige Kamelhalsfliege wurde durch ein Kuratorium namhafter Insektenkundler/-innen unter dem Vorsitz von Prof. Dr. Thomas Schmitt (Senckenberg Deutsches Entomologisches Institut in Müncheberg) zum **Insekt des Jahres 2022** gekürt. Wie alle Kamelhalsfliegen (Raphidioptera) ist sie durch einen auffallend langen Hals, glasklare Flügel und eine Größe von sechs bis 15 Millimetern gekennzeichnet. Kamelhalsfliegen gelten heute als die artenärmste Ordnung von Insekten mit vollständiger Verwandlung – also mit einem Puppenstadium. Aus den vielen fossilen Funden lässt sich aber ableiten, dass die Insekten zu Lebzeiten der Dinosaurier in viel größerer Vielfalt auf der Erde vertreten waren. Sämtliche Kamelhalsfliegen sind in allen Lebensstadien Landbewohner. Die geschlechtsreifen Insekten sind tagaktiv und ernähren sich häufig von Blatt- und Schildläusen. Bei einer ausreichenden Populationsdichte können rindenlebende Kamelhalsfliegen-Larven als „Gegenspieler“ von Schadinsekten, wie beispielsweise den Borkenkäfern, nützlich sein. [www.senckenberg.de](http://www.senckenberg.de)

## AUS DEM VBIO

## Bundesdelegiertenversammlung des VBIO fand erneut online statt

*Die diesjährige Bundesdelegiertenversammlung (BDV) des VBIO fand am 15. November statt. Angesichts der Pandemielage trafen sich die Delegierten aus Landesverbänden und Fachgesellschaften erneut virtuell.*

Breiten Raum nahmen auch in diesem Jahr die Berichte über die Arbeit des VBIO im Berichtszeitraum 2020/2021 ein. Der Präsident, Prof. Dr. Karl-Josef Dietz, verwies dabei exemplarisch auf die Aktivitäten in den Bereichen „Biodiversität, Insektenschutz, Antikörper“, „Neue Züchtungsmethoden und Synthetische Biologie“ sowie „Fortbildung und Wissenschaftskommunikation“. Hier war der VBIO gemeinsam mit Landesverbänden und Fachgesellschaften – und auch externen Partnern – mit großem Erfolg tätig. Insbesondere die kontinuierliche Zusammenarbeit mit den Gesellschaften aus Mathematik, Chemie, Physik und Geowissenschaften entwickelt sich höchst erfreulich und schlägt sich unter anderem in einer gemeinsamen Internetseite ([www.wissenschaft-verbindet.de](http://www.wissenschaft-verbindet.de)) nieder. Bedeutsam – auch für Sie als Leser/-innen – ist, dass der VBIO die Herausgeberschaft der BiUZ übernommen hat, die seit Anfang 2021 in Eigenregie des VBIO erstellt wird. Parallel zu diesen Aktivitäten mit Außenwirkung findet intern eine intensive Debatte statt, um die Arbeitsabläufe und Zusammenarbeit aller Akteur/-innen zu optimieren.

Die Sprecherin der Fachgesellschaften im VBIO, Prof. Dr. Felicitas Pfeifer, stellte die gemeinsamen Aktivitäten der Fachgesellschaften vor. Diese treffen sich regelmäßig zu Videokonferenzen, in denen sie aktuelle Aktivitäten des VBIO diskutieren und sich jeweils einem inhaltlichen Schwerpunkt widmen. So erfolgte beispielsweise ein lebhafter Austausch über Tagungen in Pandemiezeiten, Mitgliederwerbung oder über die Nationale Forschungsdateninitia-

tive NFDI. Darüber hinaus gab es eine Umfrage zu den Arbeitsweisen von Fachgesellschaften im VBIO, deren Ergebnisse diskutiert und anschließend in den von der Deutschen Physikalischen Gesellschaft initiierten Workshop „Zukunft der Fachgesellschaften“ eingebracht wurden.

Auch die Landesverbände im VBIO treffen sich regelmäßig virtuell, wie die Sprecherin der Landesverbände, Marga Radermacher, erläuterte. Leider konnten viele Veranstaltungen pandemiebedingt nicht stattfinden – so etwa die geplanten Präsenzveranstaltungen zum Karl von Frisch-Preis. Andere Veranstaltungen wichen in den virtuellen Raum aus. So fanden Vorträge, Seminare oder Biologentage als Videokonferenz statt – darunter auch umfangreichere Formate wie etwa die Lehrerfortbildung, die der Landesverband Nordrhein-Westfalen gemeinsam mit der Deutschen Physiologischen Gesellschaft und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt durchführt. Deutlich wurde, dass die Corona-Pandemie neue Möglichkeiten geschaffen hat, die über die Grenzen des eigenen Landesverbandes hinaus genutzt wurden. Die Landesverbände haben in 2021 ein Projekt initiiert, das IT-Strukturen mit dem Ziel prüft, die Zusammenarbeit von VBIO-Akteur/-innen zu erleichtern und Synergien zu entfalten.

In seinem Ausblick auf das Jahr 2022 wies der Präsident darauf hin, dass neue Arbeitsstrukturen geplant seien, die es umzusetzen und mit Leben zu füllen gelte. So sollen zu den wesentlichen Themenbereichen



**ABB. 1** Wie so viele andere Veranstaltungen konnte auch die BDV 2021 nur virtuell stattfinden. Bild: Mohamed Hassan über [www.pixabay.com](http://www.pixabay.com).

„Ständige Ausschüsse“ eingesetzt werden, und die neu konstituierten Projektgruppen „Biodiversität und Nachhaltigkeit“, „Wissenschaftskommunikation“ und „Wissenschaftlicher Nachwuchs (Wissenschaftszeitvertragsgesetz)“ ihre Arbeit ausweiten. Für 2022 stehen notwendige Anpassungen der Satzung, die Neuwahl des Präsidiums sowie die Evaluierung der BiUZ bevor.

Die Zusammenarbeit mit den Fachgesellschaften im VBIO, den großen mathematisch-naturwissenschaftlichen Gesellschaften, der Konferenz Biologischer Fachbereiche und der Bundesfachschafentagung soll fortgesetzt und intensiviert werden. Darüber hinaus gilt es, die neue Legislative und ihre Aktivitäten kritisch zu begleiten. Weitere bereits absehbare Aktivitäten betreffen die Neuregelung des Gentechnikgesetzes auf EU-Ebene, das Thema *Access and Benefit Sharing* und die aktuellen Diskussionen zu Digitalen Sequenzinformationen und zur Synthetischen Biologie.

Der Herausforderungen sind also vielfältig – aber die finanziellen Möglichkeiten des VBIO noch immer begrenzt, wie aus den Ausführungen des Schatzmeisters, Dr. Christian Lindermayr, deutlich wurde. Die Gewinnung zusätzlicher Einnahmen und damit insbesondere auch die Gewinnung von neuen Mitgliedern bleibt daher weiterhin wichtig.

*VBIO-Mitglieder finden die bei der BDV 2021 gezeigten Folien im Forum des VBIO-Intranet. [www.vbio.de/mitgliederbereich](http://www.vbio.de/mitgliederbereich)*

*Kerstin Elbing, Berlin*

## AUS DEM VBIO

## Befristung am Scheidepunkt

*Die #IchBinHanna-Debatte des vergangenen Jahres hat die vielfach prekären Beschäftigungsverhältnisse wissenschaftlichen Personals sowohl national als auch international mit großer Wucht in die Medien transportiert. Mittlerweile ist das Thema auf der politischen Bühne angekommen. Die Diskussion der Versäumnisse und möglicher Lösungsansätze ist in vollem Gange.*



Foto: Philip Wels

Die Mehrheit des wissenschaftlichen Personals neben der Professur forscht und lehrt auf befristeten Verträgen – laut Bundesbericht Wissenschaftlicher Nachwuchs (BuWiN) 2021 [1] handelt es sich fächerübergreifend um 92 Prozent der unter 45-Jährigen im Stichjahr 2018. Ermöglicht wird diese umfängliche Befristungspraxis durch das 2007 eingeführte Wissenschaftszeitvertragsgesetz (WissZeitVG [2]). Demnach dürfen wissenschaftliche Beschäftigte bis zu sechs Jahre vor der Promotion und daran anschließend für mindestens weitere sechs bzw. neun Jahre (in der Medizin) an wissenschaftlichen Einrichtungen befristet eingestellt werden, ohne dass dies eines Sachgrundes bedarf. Diese auch als „12-Jahres-Regel“ geläufige Höchstbefristungsdauer kann durch familienpolitische Komponenten (zwei Jahre pro Kind) oder in Drittmittel-finanzierten Forschungsprojekten ausgeweitet werden. Laut BuWiN ist der Anteil befristeten wissenschaftlichen Personals in den vergangenen Jahren gestiegen und verharrt seitdem auf diesem hohen Niveau. Die OECD hat im Mai vergangenen Jahres in einem Empfehlungspapier die befristet angestellten Mitarbeiter/-innen ohne Aussicht auf eine permanente Anstellung im Wissenschaftssystem als „research precariat“ definiert [3].

### Wer ist Hanna?

Die problematische Situation dieser überwiegend prekär beschäftigten Angestellten wurde in regelmäßigen Abständen in der Hochschulpolitik, von Gewerkschaften und im Wissenschaftsjournalismus thematisiert, aber die Diskussion hat niemals zu-

vor so eine Wucht und Nachhaltigkeit entfalten können wie durch die #IchBinHanna-Bewegung im Sommer 2021 [4]. Auslösend hierfür war ein Erklärvideo des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) [5], in dem am Beispiel der Biologin und Doktorandin Hanna, einer Zeichentrickfigur, das WissZeitVG und die darin festgelegten Befristungen sowie deren Notwendigkeit erläutert werden. Dort wird ausgeführt, dass die Befristung nach Meinung des BMBF dafür Sorge, dass nicht eine Generation alle Stellen verstopft und so eine Fluktuation gewährleistet, die für die Steigerung der Innovationskraft notwendig sei. Das Video wurde bereits 2018 veröffentlicht, aber offenbar erst im Juni 2021 von den Initiatoren der Aktion „95 Thesen gegen das Wissenschaftszeitvertragsgesetz“ (#95vsWissZeitVG, 2020 [6]) entdeckt und via Twitter unter dem Hashtag #IchBinHanna verbreitet. Der Hashtag trendete in beachtlicher Weise mit zeitweilig über 1.000 Tweets/Tag von Personen, die sich mit Hanna identifizierten und sich von dem infantilisierenden Ton und der Darstellung ihrer überwiegend prekären Lage in dem BMBF-Video verhöhnt fühlten. Insbesondere der Begriff der „Systemverstopfung“ durch etwaiges entfristetes Personal und die Unterstellung, dauerhafte Beschäftigung würde der Innovationskraft entgegenstehen, erzürnte die Gemüter. Viele Betroffene beteiligten sich an der Diskussion und stellten klar, dass das Damoklesschwert stets in Kürze auslaufender Verträge eine psychische Belastung darstellt, die die Leistungsfähigkeit der Betroffenen vermindert. Die Lehre

leidet in besonderem Maße unter Befristungen, da wertvolles Erfahrungswissen wegen ständig wechselnden Personals verloren geht. Das Hanna-Video wurde daraufhin vom BMBF umgehend entfernt, aber auch eine anschließende Erklärung von Staatssekretär Wolf-Dieter Lukas konnte die Lage nicht beruhigen. Am 24. Juni 2021, gerade einmal zwei Wochen nachdem der Hashtag #IchBinHanna ins Leben gerufen wurde, diskutierte die Politik das Thema der prekären Beschäftigungsverhältnisse in einer Aktuellen Stunde im Bundestag. Während sich alle Parteien einig waren, dass es hier einen Missstand zu beheben gilt, verteidigte die damalige Bundesministerin für Bildung und Forschung Anja Karliczek, CDU die gegenwärtige Befristungspraxis an Hochschulen und verwies auf Maßnahmen, die während ihrer Amtszeit zu einer Verbesserung der Arbeitsbedingungen in der Wissenschaft gesorgt haben.

### Was bislang versäumt wurde

Der Koalitionsvertrag zwischen CDU/CSU und SPD aus dem Jahre 2018 versprach „den wichtigen Weg für gute Arbeit in der Wissenschaft fort(zu)setzen und die Evaluationsergebnisse der letzten Novelle des Wissenschaftszeitvertragsgesetzes aus(zu)werten, um Karrierewege in der Wissenschaft attraktiv zu halten“ [7]. Diese Evaluationsergebnisse blieb das BMBF allerdings bis heute schuldig. „Sie können eine Evaluation nicht vornehmen“, so war von Karliczek im Juni 2021 zu hören, „wenn an Hochschulen im Moment gar nichts stattfindet“ – pandemiebedingt (Rede von Frau Karliczek im Deutschen Bundestag am 24.6.2021 [8]). Auch diese Äußerung brachte der Ministerin harsche Kritik ein. Die Auswertung der Evaluation wird nunmehr statt für Ende 2020 für das Frühjahr 2022 erwartet. Die Novelle von 2015 hatte u. a. die Befristungsmöglichkeiten des technischen Personals aus dem WissZeitVG herausgelöst, was allerdings dazu führte, dass Gelder für technische Unterstützung

nun in Drittmittelprojekten nicht mehr beantragt wurden und die Tätigkeiten auf bestehendes akademisches Personal umgelegt wurden.

### Was bisher getan wurde

Das sogenannte Tenure-Track-Programm, auch „1.000-Professuren-Programm“ genannt, war 2016 als eine Maßnahme zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses von Bund und Ländern auf den Weg gebracht worden. Dazu sollte insgesamt eine Milliarde Euro für ein gemeinsames Programm zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses an den deutschen Universitäten bereitgestellt werden. Dieser „Nachwuchspakt“ sollte dazu beitragen, die Karrierewege für Nachwuchswissenschaftler/-innen mit Hilfe von Tenure-Track-Professuren planbarer und transparenter zu machen. Bund und Länder wollten damit die Zahl der Professuren an Universitäten um 1.000 unbefristete Stellen erhöhen.

Allerdings übernahmen einige Bundesländer nicht die Anschlussfinanzierung der sechs bis acht Jahre vom Bund geförderten Professuren, so dass letztendlich die Universitäten für die Ablöseverpflichtungen aufkommen müssen. Viele der in wenigen Jahren freiwerdenden Professuren müssen somit der Finanzierung des Nachwuchspaktes geopfert werden. Ein Bottleneck, der die Perspektiven sich derzeit qualifizierender Forschender in wenigen Jahren noch einmal einengt. In derartigen Bundesländer-Programmen müssten die Länder stärker in die Pflicht genommen werden.

### Fehlende Verbindlichkeit

In dem Koalitionsvertrag von 2018 war zu lesen, dass vor dem Hintergrund anhaltend hoher Studienplatznachfrage die Bundesverwendungen im Rahmen des Hochschulpaktes verstetigt werden sollen. Ein wichtiger Schritt, denn die zeitlich befristeten Gelder des Hochschulpaktes hatten zu einer großen Zahl zusätzlicher prekärer Beschäftigungsverhältnisse geführt (BuWiN 2021). Die

Nachfolgevereinbarung, der 2019 beschlossene „Zukunftsvertrag Studium und Lehre stärken“, soll u. a. dem Ausbau unbefristeter Beschäftigungsverhältnisse des mit Studium und Lehre befassten Personals dienen. Die neue Vereinbarung hatte allerdings zwei gravierende Geburtsfehler: Zum einen waren die in Aussicht gestellten Summen fix (2021 bis 2023: 3,8 Mrd. Euro jährlich und ab 2024: 4,1 Mrd.); also war keine jährliche Dynamisierung eingeplant, die Stufenaufstiege des eingestellten Personals sowie Tarifierhöhungen der Gehälter aufzufangen vermochte. Folglich hielten und halten sich die Hochschulen mit der Entfristung des erforderlichen Lehrpersonals weiterhin stark zurück, denn – und dies ist der zweite Schwachpunkt der Vereinbarung – der Bund verpflichtete die Länder nicht, einen merklich größeren Anteil an Dauerbeschäftigung zu schaffen.

Die Einführung der notwendigen Dynamisierung ab 2022 (analog zum Pakt für Forschung und Innovation) findet sich nunmehr explizit in dem Koalitionsvertrag der neuen Ampel-Regierung, die dort zudem versprochen hat, Dauerstellen für Daueraufgaben zu schaffen (Koalitionsvertrag 2021–2025 [9]) – womit die Forderung der GEW (Gewerkschaft für Erziehung und Wissenschaft) Einzug in die Koalitionsvereinbarung erhielt.

Um die Interpretation des vielfach zitierten Wertes von 92 Prozent befristeten wissenschaftlichen Personals an deutschen Hochschulen, wie er im BuWiN 2021 angegeben ist, wurde durchaus gestritten, denn schließlich umfasse diese Zahl vor allem auch die Promovierenden. Diese Gruppe ist naturgemäß zum Zwecke der Qualifikation befristet, und auch die #IchBinHanna-Protagonisten fordern keinesfalls die Entfristung von Doktorand/-innen. Allerdings liegt bei den unter 35-Jährigen, meist Promovierende, eine Befristungsquote von 98 Prozent und für die 35- bis unter 45-Jährigen, meist Post-Docs, immer noch 77 Prozent Befristung an. In den Naturwissen-

schaften liegt der Wert bei besorgniserregenden 82 Prozent. Das prinzipielle Problem hat die Junge Akademie (JA) in einem weiterhin höchst aktuellen Positionspapier von 2013 [10] bereits treffend beschrieben: Demnach konkurrieren fächerübergreifend etwa 750 Nachwuchsgruppenleiter/-innen, 1.200 Personen auf Juniorprofessuren und jährlich 1.700 neu Habilitierte um 600 bis 700 neu zu besetzende Professuren pro Jahr. Die Zahl berufungsfähiger Wissenschaftler/-innen weiter zu steigern, sei angesichts dieser Perspektiven nicht zu verantworten [10].

### Beratung statt Stellen?

Häufig wird auch das Argument der Generationengerechtigkeit bemüht, um an der derzeitigen Befristungspraxis festzuhalten. Bei umfänglicher Entfristung stünden die Stellen der nächsten Generation nicht mehr zur Qualifikation zur Verfügung und würde die „kontinuierliche Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses lahmlegen“ (so nachzulesen in der Bayreuther Erklärung der Hochschulkanzler/-innen von 2019 [11]). Es ließe sich hier zynisch entgegenen, dass in der Tat zukünftigen Generationen der perspektivlose Pfad einer wissenschaftlichen Karriere erspart bliebe.

In dem Hanna-Video des BMBF wird ferner geraten, die individuelle Karriereplanung in der Wissenschaft frühzeitig zu beginnen und regelmäßig Beratungsangebote der Hochschule wahrzunehmen. Ähnlich äußerte sich Reinhard Jahn, langjähriger Max-Planck-Direktor und bis vor kurzem Präsident der Universität Göttingen, wenn er feststellt: „Die Institutionen und wir Professor/-innen tragen ein gerütteltes Maß an Mitverantwortung für die Misere. Es ist unsere Aufgabe, den jungen Kolleg/-innen ein ehrliches Feedback zu ihrer Karriereentwicklung zu geben“ („Was bei Hanna durcheinandergeht“, Jan-Martin Wiarda, 2021 [12]). Unzureichender Beratung und fehlendem Mentoring für die Misere die Verantwortung zuzuschieben erscheint

angesichts der Zahlen allerdings als blanker Hohn: Individuelle Beratung kann kein strukturelles Problem lösen. Rein rechnerisch wird gerade einmal jeder Fünfte der rund 3.600 Wissenschaftler/-innen, wie sie der BuWiN 2013 und die Junge Akademie aufzuführen, eine Professur bekommen können. Die Forderung nach mehr Dauerstellen und verlässlicherer Karriereplanung ist mitnichten eine Abkehr vom Leistungsprinzip, denn die 3.600 genannten berufungsfähigen Nachwuchswissenschaftler/-innen sind schließlich aus einem großen Pool an Promovierten als die Besten von den jeweiligen Lehrstuhlinhaber/-innen identifiziert worden. Sie sind kompetitiv von den Kommissionen der Hochschulen und von den Panels der Forschungsförderorganisationen ausgewählt und mit entsprechenden Mitteln ausgestattet worden. Wenn fünfmal mehr Personen qualifiziert werden, als letztendlich Professuren zu besetzen sind, dann bleiben zwangsläufig auch hervorragende Bewerber/-innen auf der Strecke. Es erscheint wenig nachhaltig und geradezu eine Ressourcenverschwendung, über zwei Jahrzehnte exzellente Wissenschaftler/-innen und Dozent/-innen auszubilden und sie spätestens mit Anfang/Mitte 40 aus dem System zu entlassen (und ein Zynismus, sie bis dahin als „Nachwuchs“ zu bezeichnen). Dass nicht jeder und jedem eine Professur versprochen werden kann, ist völlig klar, aber das derzeitige gewaltige Maß an befristeten Verträgen stellt eine extreme Ausbeutung durch das System dar.

### Was getan werden muss

Der Arbeitskreis Hochschulkarriere des VBIO hat bereits 2014 eine Position zu Wissenschaftszeitvertragsgesetz und Nachwuchsförderung erarbeitet, die großenteils weiterhin brandaktuell ist [13]. Die damals geforderte Abschaffung des Kooperationsverbotes zwischen Bund und Ländern ist bereits erfolgt und erlaubt nun umfängliche Kofinanzierungen von Seiten des Bundes im

Bereich Bildung und Wissenschaft, so etwa im „Zukunftsvertrag Studium und Lehre stärken“. Für die Ausgestaltung der Verträge sind laut BMBF jedoch die Länder und die Hochschulen zuständig. Letztere sind stärker in die Pflicht zu nehmen, und die Verantwortlichkeiten, die stets auch von Landesregierungen auf die Hochschulen geschoben werden und umgekehrt, müssen durch verbindlichere Zielvereinbarungen klar geregelt werden. Das Land Berlin hat bereits auf die #IchbinHanna-Debatte reagiert und in einer kürzlich verabschiedeten Novelle des Berliner Hochschulgesetzes (Gesetz zur Stärkung der Berliner Wissenschaft, 2021 [14]) beschlossen, dass Post-Docs aus Haushaltsmitteln nur noch mit Anschlussverwendung – gleichsam einer Tenure-Track-Vereinbarung – eingestellt werden dürfen. Die Präsidentin der Humboldt Universität zu Berlin, Sabine Kunst, ist daraufhin zurückgetreten, da sie sich außerstande sah, die neuen Vorgaben umzusetzen. Auch in der Koalitionsvereinbarung der neuen Bundesregierung findet sich eine Reihe vielversprechender Ankündigungen. Neben der bereits erwähnten und notwendigen Dynamisierung des Zukunftsvertrages sollen das WissenschaftszeitVG reformiert werden, Dauerstellen für Daueraufgaben geschaffen und Planbarkeit und Verbindlichkeit in der Post-Doc-Phase deutlich erhöht werden (Koalitionsvertrag 2021–2025) – allesamt alte Forderungen des VBIO aus dem Jahre 2014. Die bildungspolitischen Sprecher/-innen von SPD, Bündnis 90/Die Grünen und FDP hatten erst kürzlich während einer Podiumsdiskussion der GEW erklärt, Zielvorgaben für die Quote entfristeten Personals von 40 bis 50 Prozent in der Post-Doc-Phase festlegen zu wollen (derzeit 23 Prozent, BuWiN 2021). Hierfür wird eine stärkere Ausbalancierung der deutlich angestiegenen, stets befristeten Drittmittel und der weitgehend stagnierenden Grundfinanzierung von

Forschung und Lehre an den Hochschulen erfolgen müssen. Das Netzwerk für Gute Arbeit in der Wissenschaft (NGAWiss) pocht darauf, dass es sinnvolle und finanzierbare Alternativen für den Mittelbau gibt, und hat verschiedene Personalmodelle detailliert durchgerechnet (NGAWiss-Diskussionspapier „Personalmodelle“, 2020 [15]). Die Hochschulen sind jedenfalls gut beraten, sich auf neue gesetzliche Vorgaben vorzubereiten und sich bereits jetzt personalpolitisch entsprechend aufzustellen. Bleibt zu hoffen, dass die derzeitigen vielfach exzellenten „Hannas“ in diesen Zeiten des Wandels nicht als eine verlorene Generation von Wissenschaftler/-innen zurückbleiben werden.

### Literatur

- [1] [www.buwin.de/](http://www.buwin.de/)
- [2] [www.gesetze-im-internet.de/wisszeitvg/](http://www.gesetze-im-internet.de/wisszeitvg/)
- [3] <https://doi.org/10.1787/0f8bd468-en>
- [4] #IchbinHanna. <https://ichbinhanna.wordpress.com/>
- [5] [www.youtube.com/watch?v=Plq5GIY4h4E](http://www.youtube.com/watch?v=Plq5GIY4h4E)
- [6] <https://5vswisszeitvg.wordpress.com/>
- [7] [www.bundesregierung.de/breg-de/themen/koalitionsvertrag-zwischen-cdu-csu-und-spd-195906](http://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/koalitionsvertrag-zwischen-cdu-csu-und-spd-195906)
- [8] [www.bundesregierung.de/breg-de/service/bulletin/rede-der-bundesministerin-fuer-bildung-und-forschung-anja-karliczek--1937336](http://www.bundesregierung.de/breg-de/service/bulletin/rede-der-bundesministerin-fuer-bildung-und-forschung-anja-karliczek--1937336)
- [9] [www.bundesregierung.de/breg-de/service/gesetzesvorhaben/koalitionsvertrag-2021-1990800](http://www.bundesregierung.de/breg-de/service/gesetzesvorhaben/koalitionsvertrag-2021-1990800)
- [10] [www.diejungeakademie.de/fileadmin/user\\_upload/Personalstruktur\\_2013.pdf](http://www.diejungeakademie.de/fileadmin/user_upload/Personalstruktur_2013.pdf)
- [11] [www.uni-kanzler.de/fileadmin/user\\_upload/05\\_Publikationen/2017\\_-\\_2010/20190919\\_Bayreuther\\_Erklaerung\\_der\\_Universitaetskanzler\\_final.pdf](http://www.uni-kanzler.de/fileadmin/user_upload/05_Publikationen/2017_-_2010/20190919_Bayreuther_Erklaerung_der_Universitaetskanzler_final.pdf)
- [12] [www.jmwiarda.de/2021/08/12/was-bei-hanna-durcheinandergeht/](http://www.jmwiarda.de/2021/08/12/was-bei-hanna-durcheinandergeht/)
- [13] [www.vbio.de/karriere#c265](http://www.vbio.de/karriere#c265)
- [14] [www.parlament-berlin.de/ados/18/WissForsch/vorgang/wf18-0149-v.pdf](http://www.parlament-berlin.de/ados/18/WissForsch/vorgang/wf18-0149-v.pdf)
- [15] <https://mittelbau.net/diskussionspapier-personalmodelle-2/diskussionspapier-personalmodelle/>

*Sven Bradler, Göttingen  
Carsten Roller, München  
unter Mitarbeit der Mitglieder des  
Ständigen Ausschusses „Beruf und  
Karriere“ des VBIO*

## FACHGESELLSCHAFTEN

## Perspektiven für Fachgesellschaften

*Fachgesellschaften sind wichtig und unersetzbar für den Austausch und die Vernetzung der jeweiligen wissenschaftlichen Community. Doch wie steht es um die Zukunftsperspektiven der biowissenschaftlichen Fachgesellschaften? Welche Aufgaben und Herausforderungen zeichnen sich ab? Der VBIO hat dazu auf Initiative der Sprecherin der Fachgesellschaften, Prof. Dr. Felicitas Pfeifer, unter seinen Mitglieds-gesellschaften eine Bestandsaufnahme gemacht und intensiv mit den Akteur/-innen über ihre Aktivitäten, spezifische Herausforderungen und Chancen diskutiert.*

Im Bereich Biologie und Biowissenschaften sind in Deutschland über hundert größere und kleinere Fachgesellschaften etabliert, von denen 25 im VBIO Mitglied sind. Einige dieser Fachgesellschaften wurden bereits im 19. Jahrhundert gegründet (wie die Gesellschaften für Ornithologie, Botanik, Zoologie oder Mykologie). Viele Neugründungen gab es auch nach 1945, als die Biologie von der Beschreibung und Katalogisierung der Organismen zur Zellbiologie und Molekularbiologie überging. Auch Randgebiete der Biologie wie Biophysik, Biochemie, Biomedizin, Bioinformatik oder in jüngster Zeit die Synthetische Biologie entwickelten sich schnell zu eigenständigen Forschungsgebieten und führten zu neuen Verbänden der Wissenschaftler/-innen. Eigene Jahrestagungen und der Methoden-austausch in den Spezialgebieten trieben diese Diversifizierung stark voran. Daher sind Fachgesellschaften in der Biologie deutlich vielfältiger aufgestellt als in der Physik oder der Chemie. Die Deutsche Gesellschaft für Physik mit etwa 55.000 Mitgliedern und die Gesellschaft Deutscher Chemiker (etwa 30.000 Mitglieder) sind übergreifender und auch zentral organisiert. Die Mitgliederzahlen biologischer Fachgesellschaften liegen zwischen wenigen Dutzend und einigen Tausend; zu den größten zählen die Gesellschaft für Biochemie und Molekularbiologie (GBM), die Vereinigung für allgemeine und angewandte Mikrobiologie (VAAM),

die Gesellschaft für Immunologie (DGfI) und die in der DECHEMA organisierten Biotechnolog/-innen. Einige der Fachgesellschaften bieten auch interessierten Laien viel; dazu zählen die Deutsche Ornithologische Gesellschaft (DO-G) oder auch die Gesellschaft für Mykologie (DGfM), die viele Pilzliebhaber vereinigt. Neben den Mitgliedergesellschaften, zu denen DECHEMA, VAAM, DG-O und DGfM gehören, sind im VBIO etwa 4000 individuelle Mitglieder in Landesverbänden organisiert.

In Hinblick auf die Mitgliederstruktur der Fachgesellschaften im VBIO bilden Wissenschaftler/-innen bzw. Berufstätige die größte Gruppe, während die Zahl der Studierenden eher gering ist. Der Anteil der Nachwuchswissenschaftler/-innen variiert je nach Fachgesellschaft stark zwischen 0 und 50 Prozent, und die Gruppe der Senior/-innen macht zwischen weniger als einem und 20 Prozent der Mitglieder aus.

Neben einer Jahrestagung zählen spezifische Workshops, die Durchführung nationaler und internationaler Tagungen, wissenschaftliche oder allgemeinverständliche, öffentliche Vorträge sowie Fort- oder Weiterbildungen zu den Hauptaktivitäten. Viele Fachgesellschaften haben einen Newsletter und bieten Beratungen zur Karriereplanung an. Sie beteiligen sich auch an Stellungnahmen zu wissenschafts- und gesellschaftsrelevanten Themen, die oft gemeinsam mit dem VBIO erarbeitet werden.



**ABB. 1 Die Fachgesellschaften im VBIO haben intensiv über Zukunftsperspektiven diskutiert.** Foto: yourschantz über www.pixabay.com.

Die Gewinnung und Bindung von Mitgliedern stellt kleine wie große VBIO-Fachgesellschaften vor Herausforderungen. Viele haben spezielle Angebote für den wissenschaftlichen Nachwuchs, wobei insbesondere das Angebot von Karrieresymposien sowie Auszeichnungen für Abschlussarbeiten oder Preise für herausragende Arbeiten jüngerer Wissenschaftler/-innen verbreitet sind. Bei jüngeren Mitgliedern beliebt sind Fortbildungen speziell für Nachwuchskräfte oder eigens organisierte Sommerschulen zu fachspezifischen Themen. Auch das Mentoring durch erfahrene Wissenschaftler/-innen wird von einigen Fachgesellschaften angeboten. Obwohl die jüngeren Mitglieder hohe Wertschätzung genießen, gelingt es leider oft nicht, aus der Academia ausscheidende Mitglieder zu binden, was zur Stagnation oder gar Abnahme der Mitgliederzahlen führt. Auch kann sich die Situation eines bestimmten Faches auf die Situation einer Fachgesellschaft auswirken: Ist dieses Fach aufgrund der Verlagerung von Forschungsschwerpunkten und Stellen an den Hochschulen nicht mehr so stark vertreten, sinkt die Anzahl der Nachwuchskräfte und damit der potenziellen Mitglieder der Fachgesellschaft. Umgekehrt steigt damit die Notwendigkeit einer überregionalen Vernetzung und damit die

Bedeutung, sich im Rahmen einer Fachgesellschaft zusammenzuschließen.

Großes Plus einer Fachgesellschaft ist ihre Attraktivität als Netzwerkorganisation. Der immer größer werdende Bedarf an interdisziplinärer Zusammenarbeit eröffnet zusätzliche Chancen. Bei den eigenen Mitgliedern punkten die meisten der Fachgesellschaften durch den Ausbau spezifischer Informationsangebote sowie Fort- und Weiterbildungen. Die zunehmende Digitalisierung hilft dabei, sich kurzfristig und fokussiert auszutauschen und Netzwerke weiter auszubauen. Für biomedizinisch orientierte Fachgesellschaften ist es eine große Herausforderung und zugleich auch Chance, sich für die Anerkennung von in der Biologie ausgebildeten Fachwissenschaftler/-innen in der Medizin einzusetzen.

Da die Aufteilung der Fachgesellschaften in den Biowissenschaften inhaltlich vergleichsweise differenziert ist, wurden auch die Vor- bzw. Nachteile dieser historisch gewachsenen Struktur diskutiert. Einerseits ist jede der Fachgesell-

schaften nah an ihrer Community und deren Bedürfnissen, andererseits erschwert die daraus resultierende Stimmenvielfalt einen einheitlichen Außenauftritt mit gemeinsamer Stimme für die Biologie. Der inspirierende „Blick über den Tellerrand“ wird dadurch erschwert. Bearbeitet ein Biologe bzw. eine Biologin ein Forschungsgebiet, das nicht im Fokus seiner/ihrer Fachgesellschaft steht, werden andere Fachgesellschaft(en) interessant. Daher sind einige Biowissenschaftler/-innen in mehreren Fachgesellschaften Mitglied. Wichtig ist, die Mitglieder auch für Themen jenseits ihres unmittelbaren Interessensfeldes zu gewinnen und gemeinsam an fachübergreifenden Themen oder Problemen (z. T. gemeinsam mit anderen Naturwissenschaftler/-innen) zu arbeiten. Viele aktuelle Themen (wie Covid-19, CRISPR/Cas, Biodiversitätsverlust, Klimawandel oder Wissenschaftskommunikation) sind interdisziplinär und werden in verschiedenen Fachgesellschaften bearbeitet. Dabei wäre es sinnvoll, diese Arbeitsgruppen übergreifend für gemeinsame Akti-

vitäten wie etwa Tagungen zusammenzuschließen, was zunehmend auch geschieht. Der VBIO ist bei bildungs- und gesellschaftspolitisch relevanten Fragen der geeignete Ort für Diskussionen.

Inzwischen wurden unter seinem Dach auch themenspezifische Arbeitsgruppen gebildet, die den Mitgliedern der Landesverbände und der Fachgesellschaften offenstehen (z. B. zum Thema „Wissenschaftskommunikation“ oder „Biodiversität und Nachhaltigkeit“). Solche Arbeitsgruppen ebnen den Weg zu einer hörbaren Stimme der Biowissenschaften.

Die oben vorgestellte Bestandsaufnahme und die anschließenden Diskussionen unter den VBIO-Fachgesellschaften haben interessante Aktivitäten, aber auch viele Gemeinsamkeiten zwischen den Mitgliedergesellschaften erbracht. Zugleich wurden die Chancen einer intensiveren Zusammenarbeit untereinander und mit anderen Gruppen im VBIO als Zukunftsperspektive deutlich.

*Kerstin Elbing, Berlin  
Felicitas Pfeifer, Darmstadt*



## DIE VAAM STELLT SICH VOR

### Mikrobiologie in Alltag und Forschung

**Was beschäftigt eigentlich die Fachgesellschaften im VBIO? Neben Jahrestagung, Nachwuchsförderung und Fachgruppenarbeit sind unsere Mitgliedsgesellschaften vielfältig aktiv. Wir stellen die Arbeit der Fachgesellschaften in lockerer Folge vor. Den Auftakt macht die Vereinigung für Allgemeine und Angewandte Mikrobiologie (VAAM), die mit ihrer Öffentlichkeitsarbeit auf die wichtigen Beiträge von Mikroorganismen für unser Leben hinweist.**

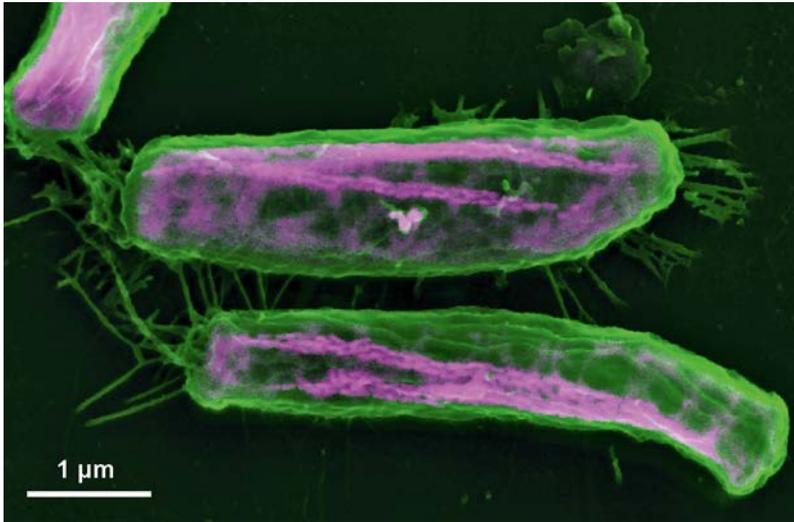
Backwaren und Bier sind eng mit einer Mikrobe, der Hefe *Saccharomyces cerevisiae*, verbunden. Deren bedeutungsvolles Werk ehrt die VAAM aktuell mit der Auszeichnung „Mikrobe des Jahres“ (<http://mikrobedesjahres.de/>). Damit zeichnet der Mikrobiologenverband zum neunten Mal einen kleinen Organismus für

seine Verdienste für die Menschheit aus. So macht die VAAM auf die Vielfalt der mikrobiologischen Welt aufmerksam und weist auf die bedeutsame Rolle der Mikroorganismen für die Ökologie, Gesundheit, Ernährung und Wirtschaft hin.

So sind Streptomyzeten (Mikrobe des Jahres 2016) wichtige Antibio-

tikproduzenten und beleben unseren Waldboden. *Magnetospirillum* (2019, Abbildung 1) kann seine Schwimmbewegung am Magnetfeld ausrichten und bietet faszinierende Anwendungsmöglichkeiten als „Mini-Magnet“. Und die Teichpflaume (*Nostoc*, 2014), die erste Mikrobe des Jahres, ist sogar für das bloße Auge sichtbar und gilt als Anzeiger für ein intaktes Ökosystem. Diese und viele weitere spannende Informationen zu den ausgezeichneten Mikroben sind mittlerweile auch auf Englisch verfügbar (<http://microbeoftheyear.org/>).

Die „Mikrobe des Jahres“ ist eines der VAAM-Projekte, um den Fokus auf das Fachgebiet Mikrobiologie zu lenken. 3500 mikrobiologisch orientierte Wissenschaftler/



**ABB. 1** *Magnetospirillum*, die Mikrobe des Jahres 2019. Foto: Gerhard Wanner.

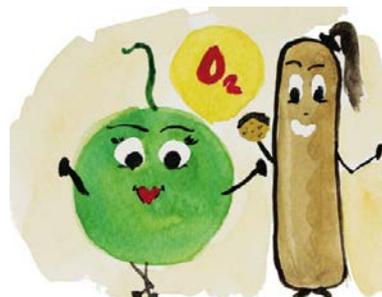
-innen sind in der VAAM zusammengeschlossen, um den wissenschaftlichen Informationsaustausch zu fördern und Forschungsergebnisse der Mikrobiologie zum Wohl der Gesellschaft und der Umwelt umzusetzen.

Vor bald 50 Jahren hatten sich Mikrobiolog/-innen in Deutschland erstmals vernetzt, damals noch unter dem Dach der amerikanischen Schwesterorganisation ASM. Nachdem immer mehr Lehrstühle für Mikrobiologie in Deutschland eingerichtet worden waren und wichtige Impulse aus der deutschen mikrobiologischen Forschung auch international an Bedeutung gewannen, entstand daraus 1985 die VAAM. Nach der Wiedervereinigung schloss sich die Gesellschaft für Allgemeine und Technische Mikrobiologie (GATM) der ehemaligen DDR der VAAM an.

Herzstück der VAAM sind 18 Fachgruppen, die die verschiedenen Bereiche der Mikrobiologie widerspiegeln – von Archaea bis Zellbiologie. Viele dieser Gruppen sind mit anderen Verbänden vernetzt, wie etwa der medizinischen Mikrobiologie oder der Biotechnologie. Eng verbunden ist die VAAM auch mit der Gesellschaft für Biochemie und Molekularbiologie (GBM), mit der sie sich die Geschäftsstelle in Frankfurt am Main

teilt. Die beiden Fachgesellschaften gründeten 1995 die Zeitschrift *BIOspektrum*, die – ergänzt um weitere Gesellschaften – das deutschsprachige Organ der molekularbiologischen Fachgesellschaften ist und mit Übersichtsartikeln, Berichten aus der Community, Journal Clubs und Personalia das wissenschaftliche Leben bereichert.

Mit niederschweligen Angeboten, etwa Hinweisen auf Schülerlabore und Unterrichtsmaterialien, trägt die VAAM zur Verbreitung des Wissens um die Bedeutung der Mikroorganismen für unser Leben und die Umwelt bei. Dazu zählt auch die Website „Kurze Frage“, die kurzweilige, mit Comics (Abbildung 2) illustrierte Antworten liefert – auf Fragen wie „Warum sind



**ABB. 2** Die Website [https:// kurze-frage.info/](https://kurze-frage.info/) der VAAM gibt prägnante Antworten auf Fragen aus der Welt der Mikrobiologie, etwa zu **Mikroben-Freundschaften**. Quelle: Ingeborg Heuschkel/VAAM CC 4.0.

Viren keine Mikroben?“ oder „Können sich Mikroben unterhalten?“.

Drei Preise unterstützen und fördern den mikrobiologischen Nachwuchs: Der alljährliche VAAM-Forschungspreis zeichnet aufstrebende Nachwuchswissenschaftler/-innen für herausragende aktuelle Arbeiten auf dem Gebiet der allgemeinen Mikrobiologie aus. Alle zwei Jahre wird der Innovationspreis für angewandte Forschung verliehen. Jährlich erhalten zwei bis vier Doktorand/-innen den VAAM-Promotionspreis für herausragende mikrobiologische Dissertationen.

Die Förderung des Nachwuchses liegt der VAAM besonders am Herzen. Gerade aus der Taufe gehoben wurde das *VAAMentoring*, mit dem erfahrene Berufstätige Nachwuchskräfte bei ihrer Karriereplanung unterstützen und ihnen Orientierung verschaffen. Dieses Angebot ergänzt das bei jungen Forschenden sehr beliebte Karrieresymposium, auf dem Mikrobiolog/-innen ihren eigenen Werdegang schildern, die Hürden und Hilfen verdeutlichen und ihre Tipps zum Netzwerken weitergeben.

Diese Veranstaltung ist Teil der beliebten VAAM-Jahrestagung, die an jährlich wechselnden Orten über 1000 Mikrobiolog/-innen aus Deutschland und darüber hinaus anzieht. Dieser Magnet der Mikrobiologie ist die Vernetzungszentrale der „Mikrobio-Familie“ mit sehr vielen Jungwissenschaftler/-innen, die erste Vorträge halten und wichtige Verbindungen knüpfen sowie faszinierenden aktuellen Präsentationen aus der Welt der Mikrobiologie lauschen. Zur Tagung gehören auch bunte Veranstaltungen wie etwa der spannende *Microbe Slam* und der fröhliche „Mixer“, bei dem Spaß und Tanz eine ebenso wichtige Rolle spielen wie Backwaren und Bier – denn Mikroben sind immer dabei und prägen unsere Welt.

Anja Störiko, VAAM

## NOBELPREIS

## Somatosensorik und Ionenkanäle

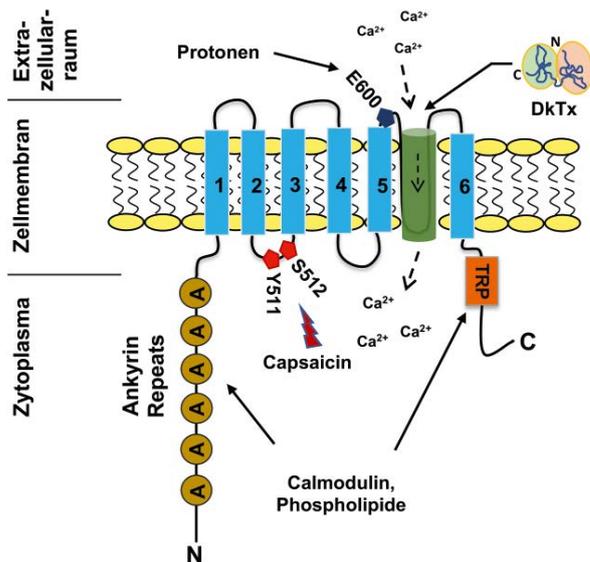
Der Nobelpreis für Physiologie oder Medizin wurde dieses Jahr an die Wissenschaftler David Julius und Ardem Patapoutian für ihre Arbeiten über die Wahrnehmung thermischer und mechanischer Reize verliehen. Die beiden Forscher identifizierten Kationenkanäle, die für die Perzeption von Temperatur und Druck essentiell sind.

In der Arbeitsgruppe des Physiologen David Julius an der *University of California – San Francisco* (UCSF) wurde 1997 der Capsaicinrezeptor identifiziert. Capsaicin (trans-8-methyl-N-vanillyl-6-nonenamid) ist eine Verbindung aus Chilischoten und bewirkt die Schärfe von chilihaltigem Essen. Zur Klonierung des Capsaicinrezeptors wurde die Methode der Expressionsklonierung angewandt, d. h. es wurde nach einer cDNA gesucht, deren Expression in der Zelle capsaicinabhängig einen Anstieg der intrazellulären  $\text{Ca}^{2+}$ -Konzentration bewirkte. Der so gefundene Capsaicinrezeptor stellte sich als ein Mitglied der TRP-

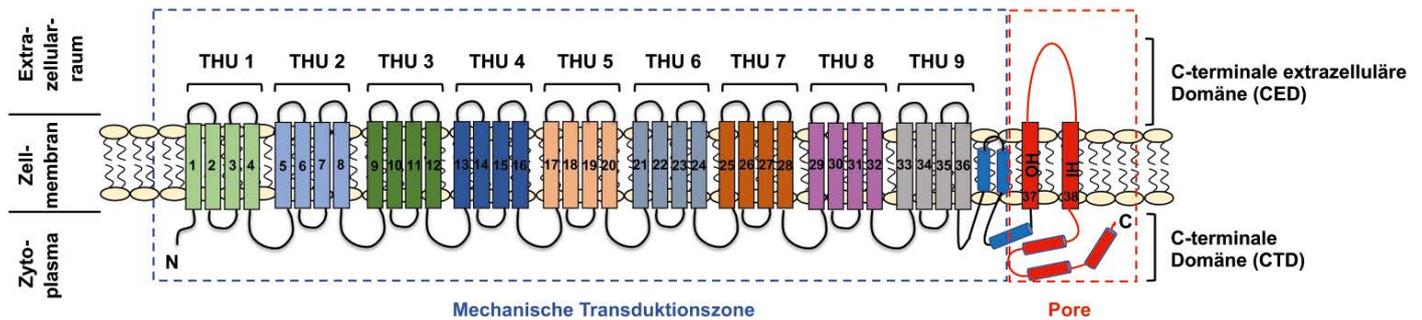
(„transient receptor potential“-) Familie von Ionenkanalproteinen heraus und wurde in TRPV1-Kanal umbenannt. TRPV1 besitzt 6 Transmembrandomänen, wobei die Ionenpore von den Transmembrandomänen 5 und 6 gebildet wird. Das Protein besitzt zudem Bindungsstellen für verschiedene Signalmoleküle (Calmodulin, Phospholipide), die die Kanaleigenschaften modulieren (Abbildung 1, [1]). TRPV1 ist ein polymodaler Ionenkanal thermosensoryischer Nervenzellen, der durch Capsaicin und andere pflanzliche Verbindungen sowie durch thermische Stimuli aktiviert wird, d. h. Temperaturänderungen der Umgebung werden durch TRPV1 detektiert und in sensorische Nervenzellen in elektrische Signale umgewandelt. Somit ist TRPV1 ein Detektionssystem für „scharf“ (Chilischote) und für „heiß“ (die Temperaturerhöhung). Ein chilihaltiges Gericht kann daher auch ein brennendes Hitzegefühl induzieren. Auch Protonen, die bei Gewebsverletzungen und Entzündungen freigesetzt werden, sowie verschiedene Toxine aktivieren TRPV1, wie beispielsweise das „double-knot“-Toxin (DKTx) der Vogelspinne *Ornithoctonus huwena*. Verschiedene Lipide wie N-Arachidonyl ethanolamin, N-Arachidonyldopamin, N-Oleoyldopamin und das Leukotrien B<sub>4</sub> sind möglicherweise endogene TRPV1-Liganden. Da die Stimulation des TRPV1-Kanals in sensorischen Nervenzellen zu einer Schmerzempfindung führen kann [2], war die Entdeckung von TRPV1 ein wichtiger Schritt, um die Schmerzempfindung auf der molekularen Ebene zu verstehen. Gleichzeitig war diese Entdeckung die

Grundlage für translationale medizinische Initiativen mit dem Ziel, die TRPV1-Aktivität medikamentös so zu beeinflussen, dass Schmerzen gelindert werden können [3].

Der zweite Nobelpreisträger 2021 ist der Zellbiologe Ardem Patapoutian vom *Scripps Research Institute* in La Jolla, San Diego, in dessen Labor zwei Ionenkanäle entdeckt wurden, die durch mechanische Kräfte wie Berührung, Dehnung oder Druck aktiviert werden und die die mechanischen Signale in elektrische Signale umsetzen [4]. Dabei fungieren die mechanosensoryischen Piezo1- und Piezo2-Proteine als Mechanotransducer, die die Information der mechanischen Reize auf die Zelle übertragen. Die Piezo1/2-Proteine sind große Membranproteine mit über 2000 Aminosäuren, die mit 38 Transmembranhelices in der Membran verankert sind (Abbildung 2). Jeweils vier dieser Transmembranhelices sind repetitiv in Transmembranhelix-Units (THU) angeordnet. Strukturelle Studien zeigten, dass Piezo1 trimerisiert und wie ein Propeller mit drei Flügeln aussieht. Diese Propellerstruktur dient der Mechanoperzeption. Die letzten zwei C-terminalen Transmembrandomänen bilden in dem Trimer die zentrale Pore, durch die nach mechanischer Aktivierung positiv geladene Ionen, einschließlich  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen, in die Zelle strömen. Schließlich dienen weitere Domänen am C-Terminus der Piezo-Kanäle zur Signalübertragung. Genetische Studien an Mäusen zeigten, dass die Piezo-Kanäle ein therapeutisches Ziel zahlreicher Erkrankungen darstellen. Beim Menschen wurden Piezo-Mutationen entdeckt, die ebenfalls mit Krankheiten korrelieren. So könnte eine Manipulation der Piezo-Proteine beispielsweise bei Stomatocytosis, Malariainfektion, Allodynia, Bluthochdruck und bei verschiedenen respiratorischen Erkrankungen therapeutisch eingesetzt werden [5]. Chemische Aktivator der Piezo-Proteine wurden entdeckt, so dass die Aktivität dieser Ionenkanäle pharmakologisch beeinflusst werden kann.



**ABB. 1** Moduläre Struktur des Capsaicinrezeptors TRPV1. Der Ionenkanal hat 6 Transmembrandomänen, wobei sich die Ionenpore zwischen der 5. und 6. Transmembrandomäne befindet. TRPV1 wird durch Capsaicin aktiviert, dessen Bindungsstelle intrazellulär ist, und durch Protonen, die an extrazelluläre Bindungsstellen zwischen der 5. und 6. Transmembrandomäne binden. Das Vogelspinnengift DkTx bindet an die Pore und arretiert den Kanal in der geöffneten Konformation. Die Abbildung ist mit Einverständnis des Wiley-VCH-Verlags mit einigen Änderungen dem Literaturhinweis [1] entnommen.



**ABB. 2** Moduläre Struktur des mechanosensitiven Ionenkanals Piezo1. Das Kanalprotein besitzt 38 Transmembrandomänen, wovon 36 in 9 „transmembrane helical units“ (THU) mit jeweils 4 Transmembranhelices strukturiert sind. Am C-Terminus befindet sich die Ionenpore sowie die Domäne, die zur Signaltransduktion dient (CTD, intracelluläre C-terminale Domäne).

In weiteren Arbeiten von Julius und Patapoutian wurden unabhängig voneinander der temperatursensitive TRPV8-Kanal identifiziert, der durch Kälte oder kühlend wirkende Verbindungen wie Menthol oder Eucalyptol aktiviert wird, und der TRPA1-Kanal, der durch chemische Verbindungen aus Meerrettich, Knoblauch, Senf und Wasabi stimuliert wird. Genauso wie die TRPV1- und TRPM8-Kanäle dient der TRPA1-Kanal zur Temperaturdetektion. TRPM8 wird auch als Mentholrezeptor bezeichnet, TRPA1 als Wasabi-rezeptor. Insgesamt dokumentieren die exzellenten Arbeiten von Julius

und Patapoutian, wie thermische, mechanische und chemische Stimuli von Ionenkanälen perzeptiert und in Nervenimpulse umgewandelt werden. Transgene Mausmodelle sowie molekulargenetische Studien zeigen das translationale Potenzial dieser Forschung.

### Literatur

- [1] G. Thiel, T. M. Backes, O.G. Rössler (2020). Chili und der Capsaicinrezeptor TRPV1: Some like it hot – and spicy, *Biologie in unserer Zeit* 50, 246–252.
- [2] M. Tominaga et al. (1998). The cloned capsaicin receptor integrates multiple pain-producing stimuli, *Neuron* 21, 531–543.
- [3] M. M. Moran, A. Szallasi (2018). Targeting nociceptive transient receptor potential channels to treat chronic pain: current state of the field, *Brit J Pharmacol* 175, 2185–2203.
- [4] B. Coste et al. (2010). Piezo1 and Piezo2 are essential components of distinct mechanically activated cation channels, *Science* 330, 55–60.
- [5] B. Xiao (2020). Levering mechanically activated Piezo channels for potential pharmacological intervention, *Annu Rev Pharmacol Toxicol* 60, 195–218.

*Tobias M. Backes, Oliver G. Rössler, Gerald Thiel, Medizinische Biochemie und Molekularbiologie, Universität des Saarlandes, E-mail: gerald.thiel@uks.eu*

## TAXONOMIE

### Salzkrebschen der Gattung *Artemia*: Who's who?

**Artemien spielen eine überaus wichtige Rolle in Aquakultur und Forschung. Über ihre Systematik jedoch herrscht traditionell Uneinigkeit. Eine aktuelle Studie versucht, per Erbgutanalyse Klarheit zu bringen – und wirft einen der bislang wichtigsten wissenschaftlichen Artnamen über Bord.**

Die einen kennen sie noch aus den Yps-Heften, die anderen verfüttern täglich ihre Naupliuslarven an Aquarienfische, wieder andere beschäftigen sich wissenschaftlich mit ihnen. Unter den „Urzeitkrebse“ der Klasse Branchiopoda nehmen die Salzkrebschen oder Artemien eine ganz besonders prominente Rolle ein.

Ab den 1930er Jahren wurden ihre nur 0,2 bis 0,3 mm messenden „Dauereier“, die Zysten, in Salzseen Kaliforniens und dem Great Salt Lake in Utah geerntet, zunächst vorwiegend für Aquarianer. Vorteil: Die trocken aufbewahrten oder eingefrorenen Zysten lassen sich preiswert versenden (eine Million davon wiegt gerade einmal 4 g),

sind jahrelang haltbar, und bei Bedarf werden sie einfach in Salzwasser inkubiert. Etwa 24 bis 48 Stunden später stehen unzählige winzige Larven als nahrhaftes Futter für Fischbrut zur Verfügung. Da die Larven unselektiv alles in sich hineinstrudeln, was eine passende Partikelgröße hat, lassen sich über sie auch Medikamente oder besondere Nährstoffe verabreichen.

Mit der bis heute stetig boomenden Aquakultur wuchs der Bedarf rasant, denn unzählige Mäuler von Fischen und Krebstieren wollten gestopft sein. Weltweit stiegen immer mehr Produzenten in das lukrative Geschäft ein. Von weniger als 100 t jährlich in den 1980er Jahren stieg die Erntemenge auf 2.000 t um die Jahrhundertwende und bis



**ABB. 1** Ein männliches Salzkrebschen der Art *Artemia monica* aus dem Mono-Lake in Utah. Foto aus Wikipedia, CC BY 2.0.

auf 3.000 t aktuell. Somit ist *Artemia* der Motor für eine milliarden-schwere Industrie [1, 2]. Neben der Verwendung als Futter für Aquakulturen für den menschlichen Verzehr ist *Artemia* nach wie vor auch unentbehrlich in der Aquarienfischzucht – einem Industriezweig, der jährlich hunderte Millionen Dollar umsetzt. Parallel entwickelte sich *Artemia* zu einem wichtigen Studienobjekt für die Grundlagenforschung von Physiologen, Biologen, Biochemikern, Ökotoxikologen und Genetikern [3]. Sogar als eine hervorragende Proteinquelle, reich an  $\beta$ -Karotin und Riboflavin, werden Salzkrebschen entdeckt oder besser wiederentdeckt [4].

Wo viel Licht ist, kann aber auch Schatten nicht ausbleiben. Durch absichtliche Einführung oder unabsichtliche Verschleppung machen sich manche Artemienarten bereits als invasive Neozoen breit, die heimische Arten verdrängen, beispielsweise im Mittelmeerraum [5].

### Schwierige Bestimmung

Angesichts einer solchen kaum zu überschätzenden Wichtigkeit für Wissenschaft und Forschung, aber auch für die Welternährung aus Aquakultur, mag es überraschen, dass sich Experten noch immer darüber streiten, wie viele und welche Arten die Gattung *Artemia* überhaupt umfasst. Schließlich ist

es doch für Publikationen, aber auch für den konkreten Einsatz als Fischfutter essenziell, darüber Bescheid zu wissen, mit welcher Spezies man es eigentlich zu tun hat – beispielsweise unterscheiden sich die Schlupfgrößen der Naupliuslarven verschiedener Arten.

Bei genauerem Hinsehen allerdings werden die Schwierigkeiten der Systematiker und Taxonomen verständlich, denn die für eine Bestimmung relevanten Merkmale können je nach Umweltbedingungen erheblich variieren [6]. So geisterten im Lauf der Zeit über 50 Namen durch die Literatur, und es wurden mal mehr, mal weniger Arten anerkannt. Allgemeine Einigkeit bestand dagegen bis vor Kurzem darüber, welchen Namen das weltweit am meisten gezüchtete Salzkrebschen trägt: *Artemia franciscana*.

### Neue Einsichten

Mittels neuester genetischer Methoden versuchte nun ein Forschungsteam, Licht ins Dunkel zu bringen – und sorgte für eine faustdicke Überraschung [6]! Tatsächlich konnten die Wissenschaftler lediglich fünf „evolutionäre Einheiten“ nachweisen. Als korrekte Namen stufen sie ein: *Artemia persimilis* Piccinelli & Prosdocimi, 1968 für die Linie des Südkegels Südamerikas, *Artemia salina* (Linnaeus, 1758) für die Linie Mittelmeerraum-Südafrika, *Artemia urmiana* Günther, 1899 für die Linie Westasiens sowie *Artemia sinica* Cai, 1989 für die Linie Ostasiens.

Für die Linie aus nördlicheren Gefilden der Neuen Welt, die heute für die *Artemia*-Ernte weltweit die Nummer 1 stellt, versenken die Forscher jedoch den bislang in aller Regel verwendeten Namen *Artemia franciscana* in der Synonymie: Ihnen zufolge hat der Name *Artemia monica* Verrill, 1869 Vorrang. Es stellte sich nämlich heraus, dass die verfügbare DNA der als bedroht angesehenen *Artemia monica* (Abbildung 1), die bislang als Endemit

des Mono-Sees in Kalifornien betrachtet wurde, weitgehend unter anderem mit derjenigen von Salzkrebschen aus dem Westen der USA übereinstimmt, darunter die Populationen aus dem *Great Salt Lake* und der Bucht von San Francisco – die jedoch Typuslokalität von *Artemia franciscana* ist. Genetische Unterschiede zwischen diesen Salzkrebschen fallen in den Bereich normaler Variationsbreiten einer Art.

Die Autoren weisen darauf hin, dass früher etliche Autoren der Mono-Population einen eigenen Artstatus abgesprochen haben, etwa aufgrund von Experimenten, die ergaben, dass sich Exemplare von *Artemia monica* und *Artemia franciscana* problemlos miteinander verpaaren ließen und für Nachkommen sorgten – auch dies bereits ein Hinweis darauf, dass es sich nur um eine einzige Art handelt.

### Strenge Regeln

Für die Benennung von Tierarten gelten strikte Vorgaben, die in den „Internationalen Regeln für die Zoologische Nomenklatur“ zusammengefasst sind. Normalerweise hat jeweils der älteste gültig publizierte Name einer Art Vorrang über später veröffentlichte. Im Fall von *Artemia franciscana* existieren gleich mehrere ältere Namen, von denen die Forscher *A. monica* Priorität einräumen. Zwar sehen die nomenklatorischen Regeln Ausnahmen für Fälle vor, in denen jüngere Namen bereits sehr stark verankert sind. So muss ein vorherrschend gebrauchter jüngerer Namen unter anderem dann beibehalten werden, wenn der ältere Name nach 1899 nicht als gültig verwendet wurde. Dies ist aber bei *Artemia monica* nicht der Fall, denn diese Bezeichnung wurde vielfach im 20. und 21. Jahrhundert benutzt.

Die Autoren betonen, der Vorrang von *Artemia monica* über *Artemia franciscana* könne somit durch den nomenklatorischen Code nicht außer Kraft gesetzt werden. Somit sei *Artemia monica* ab sofort

der gültige Name für die nördliche neuweltliche Linie von *Artemia*. Alle früher als *Artemia franciscana* angesprochenen Populationen seien daher als *Artemia monica* einzustufen. Sollte sich diese Ansicht durchsetzen, hätte dies gewaltige Konsequenzen für die wissenschaftliche Literatur. Allein bei der auf derartige Publikationen ausgelegten Suchseite „Google Scholar“ erzielt „*Artemia franciscana*“ rund 13.700 Treffer.

### Literatur

- [1] J. White: *Artemia*, the ‘magic powder’ fueling a multi-billion-dollar industry. Online unter <https://www.globalseafood.org/advocate/artemia-the-magic-powder-fueling-a-multi-billion-dollar-industry/>, Download: 28.10.2021.
- [2] P. Sorgeloos, R. Roubach (2021). Past, present and future scenarios for SDG-aligned brine shrimp *Artemia* aquaculture. *FAO Aquaculture Newsletter*, 63, 56–57.
- [3] J. Dhont, P. Sorgeloos (2002): Applications of *Artemia*. S. 251–277 in: *Artemia: Basic and Applied Biology*.

- [4] N. Van Hoa, P. Sorgeloos (2020): Brine Shrimp *Artemia* as a Direct Human Food. *World Aquaculture*, September, 24–25.
- [5] F. Amat et al. (2005). The American brine shrimp as an exotic invasive species in the western Mediterranean. *Biological Invasions* 7, 37–47.
- [6] L. Sainz-Escudero et al. (2021): Settling taxonomic and nomenclatural problems in brine shrimps, *Artemia* (Crustacea: Branchiopoda: Anostraca), by integrating mitogenomics, marker discordances and nomenclature rules. *PeerJ* 9: e10865, <https://doi.org/10.7717/peerj.10865>

Kriton Kurz, Speyer

## ZOOLOGIE

### Milane: Stabile Bestände bei Langzeitmonitoring in Westpolen

**Der Rotmilan steht auch als „Konfliktart“ immer wieder im Spannungsfeld der Interessen, z. B. wenn es um die Landschaftsentwicklung geht. Seine Eignung als Bioindikator zur Bewertung der Qualität von Räumen lässt sich vor allem durch Langzeituntersuchungen in unterschiedlichen Regionen untermauern. Dies gilt auch für die Zwillingart Schwarzmilan und das Verhältnis beider Arten zueinander.**

**ABB. 1** Der Rotmilan steht als „Symbolvogel“ einer historisch gewachsenen Kulturlandschaft immer wieder im Fadenkreuz.



Auf gezielte Naturschutzmaßnahmen – sowohl, was die Neststandorte als auch was den gesamten Waldbestand angeht – sowie auf die Tatsache, dass größere Habitatstrukturen erhalten geblieben sind, führen polnische Ornithologen die stabilen Milanbestände im Westen des Landes zurück. Auf zwei Untersuchungsflächen – einem Mosaik aus verschiedenen Habitaten (Fläche A) und bewirtschaftetem Ackerland (Fläche B) –

hatten sie in zwei Untersuchungszeiträumen (in den Jahren 1996–2001 und 2012–2017) annähernd stabile Bestände (Bruterfolg und Habitatstruktur der Territorien beider Arten) feststellen können. Die Anzahl an Territorien des Rotmilans in der Untersuchungsfläche A (Habitatmosaik) betrug in den beiden Zeiträumen 35 (3,65 Paare/100 km<sup>2</sup>) und 38 (3,97 Paare/100 km<sup>2</sup>), während diese für den Schwarzmilan bei 39 (4,07 Paare/

100 km<sup>2</sup>) und 41 (4,28 Paare/100 km<sup>2</sup>) lagen, berichten die Forscher im „Journal für Ornithologie“. Der Bruterfolg betrug beim Rotmilan 77,4 und 67,5 Prozent in den beiden untersuchten Zeiträumen und beim Schwarzmilan 63,9 und 74,6 Prozent.

Auf der Probefläche B (intensiv bewirtschaftetes Ackerland) identifizierten die Forscher in den beiden Zeiträumen 10 (1,35 Paare/100 km<sup>2</sup>) und 8 (1,08 Paare/100 km<sup>2</sup>) Territorien des Rotmilans, während die Zahlen beim Schwarzmilan bei 3 (0,41 Paare/100 km<sup>2</sup>) bzw. 5 (0,68 Paare/100 km<sup>2</sup>) lagen. Der Bruterfolg des Rotmilans machte in den beiden Zeiträumen 87,5 bzw. 78,6 Prozent aus. „Das Ausbleiben jeglicher Veränderungen der Populationszahlen beider Arten und der hohe Bruterfolg lagen wahrscheinlich daran, dass die Neststandorte und der ausgewachsene Waldbestand Gegenstand von Naturschutzmaßnahmen sind, die durch die staatliche Forstverwaltung Polens eingeführt wurden, sowie daran, dass größere Veränderungen der Habitatstrukturen fehlen,“ so das abschließende Fazit der Autoren.

### Literatur

- [1] G. Maciorowski et al. (2021). Breeding habitats and long-term population numbers of two sympatric raptors – Red Kite *Milvus milvus* and Black Kite *M. migrans* in the mosaic-like landscape of western Poland. *J. Ornithol.* 162, 125–134.

Wilhelm Irsch,  
Rebblingen-Siersburg

## ZOOLOGIE

## Wiederkäuer: Klima-Killer oder faszinierende Spezies?

*Wiederkäuer repräsentieren eine mit etwa 200 Arten große Gruppe von Tieren, deren Vormagensystem das verbindende Element ist. Durch das in den Vormägen etablierte mikrobielle Ökosystem können Wiederkäuer Nährstoffe fermentieren, die durch körpereigene Enzyme nicht abbaubar sind. Mit den Fermentationsgasen Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Methan (CH<sub>4</sub>) emittieren sie klimarelevante Treibhausgase. Der folgende Artikel soll beide Aspekte – die hohe Kapazität der Nährstoffveredlung und ihre Bedeutung für den Klimawandel – umreißen.*

Während die Entstehung des Tierreichs in die Zeit des Neoproterozoikum vor etwa 700 Millionen Jahre datiert wird [1], haben sich die Wiederkäuer (Ruminantia) erst vor etwa 50 Millionen Jahren entwickelt und sind damit im Sinne der Evolution noch als relativ „jung“ anzusehen [2]. Sie stellen eine Unterordnung der Ordnung Paarhufer (Artiodactyla) dar und werden durch die folgenden 6 Familien repräsentiert: Tragulidae (Hirschferkel) sowie die unter dem Begriff Pecora (Stirnwaffenträger) zusammengefassten Giraffidae (Giraffenartige), Moschidae (Moschushirsche), Antilocapridae (Gabelhornträger), Cervidae (Hirsche) und die Bovidae (Hornträger). Unter diesen Familien gelten die Trigulidae als die ältesten Wiederkäuer, die sich im Zuge der Entwicklung nur wenig verändert haben und daher auch als „living fossils“ bezeichnet werden [3]. Die übrigen Wiederkäuer haben sich erst vor 10–20 Millionen Jahren

entwickelt. Die Anzahl der Genera und der Spezies innerhalb der einzelnen Familien weisen sehr große Unterschiede auf. So bildet der Gabelbock als eine Spezies das einzige Genus innerhalb der Antilocapridae, während zu den Bovidae 49 Genera und 140 Spezies gerechnet werden [4]. Die Gesamtzahl der Spezies innerhalb der Ruminantia beläuft sich auf etwa 200 Arten. Mit einer Körpermasse zwischen 3 und 7 kg sind die afrikanischen Zwergantilopen (Dikdiks) die kleinsten Wiederkäuer; amerikanische Bisons oder Wasserbüffel ebenso wie hochgezüchtete Fleischrinder können Körpergewichte von über 800 kg erreichen. Das gemeinsame Merkmal aller Wiederkäuer ist das aus den drei Abschnitten Haube (Reticulum, Netzmagen), Pansen (Rumen) und Blättermagen (Omasum, Buchmagen) bestehende Vormagensystem, das dem eigentlichen Magen (Abomasum, Labmagen) vorgelagert ist. Lediglich bei den Tragulidae ist der Blättermagen noch nicht voll entwickelt und besteht aus dem Omasum-ähnlichen Isthmus. Bei der Geburt sind alle Magenanlagen vorhanden; die morphologische und funktionelle Entwicklung der Vormägen ist eng mit der mikrobiellen Besiedlung assoziiert und erfolgt in den ersten Lebenswochen. Die Ausbildung einzelner Magenabteilungen ist nicht auf Wiederkäuer begrenzt: So sind beispielsweise auch bei Kamelen, Flusspferden oder Faultieren Vormagen-ähnliche Abteilungen ausgebildet, die

auch ähnliche Stoffwechseleigenschaften aufweisen können, wie sie von Wiederkäuern bekannt sind.

### Unterschiedliches Futteraufnahmeverhalten

Trotz prinzipieller Ähnlichkeiten des Vormagensystems haben sich bei Wiederkäuern Präferenzen im Futteraufnahmeverhalten entwickelt. In grundlegenden Arbeiten wurde die Klassifizierung dieser Verhaltensmerkmale in „Browser“ (Konzentratselektierer), „Grazer“ (Grasfresser) und „Intermediate Feeders“ abgeleitet [5, 6]. Nach dieser Klassifizierung selektieren die „Browser“ hochwertiges Futter, das Konzentrateigenschaften aufweist (Abbildung 1). Dagegen bevorzugen die „Grazer“ Grundfutter, das in Weideregionen zu finden ist (Abbildungen 2 und 3). Die „Intermediate Feeders“ nehmen eine Zwischenstellung ein und wechseln ihr Futteraufnahmeverhalten je nach saisonaler Verfügbarkeit (Abbildung 4). In der von Hofmann 1989 entwickelten Klassifizierung [6] wird deutlich, dass die domestizierten Hauswiederkäuer zur Gruppe der „Grazer“ (Rind und Schaf) bzw. der „Intermediate Feeders“ (Ziege) zählen. Aus der Klassifizierung nach Fressverhalten und der Anatomie des Verdauungstraktes leitete Hofmann funktionelle Konzepte ab. So vermutete er für Grasfresser gegenüber den Konzentratselektierern aufgrund eines größeren Pansenvolumens und einer längeren Verweilzeit im Pansen und im Blättermagen eine bessere Fermentation des faserreichen Pflanzenmaterials. Er führte zudem umfangreiche anatomische Studien zur Größe der wichtigsten Speicheldrüsen durch und konnte zeigen, dass bei Konzentratselektierern der prozentuale Anteil der Ohrspeicheldrüse mit 0,18–0,22 Prozent der Körpermasse deutlich größer war als bei Grasfressern (0,05–0,07 Prozent). Daraus vermutete er bei Konzentratselektierern eine höhere Speichelsekretionsrate als Grundlage einer höheren Verdünnungsrate und damit einer kürzeren Verweilzeit der Ingesta



**ABB. 1** Kamele zählen nicht zu den Wiederkäuern, aber sie kauen wieder und sie „browsen“. Hier eine Aufnahme aus der Dornbuschsavanne in Kenia. Foto: G. Breves.

in den Vormägen. Diese hypothetischen Konzepte haben in den Folgejahren zu einem intensiven wissenschaftlichen Diskurs geführt und sind durch verschiedene Studien widerlegt worden [7]. Dabei ist die grundlegende Klassifizierung der Wiederkäuer im Hinblick auf ihre Futterpräferenzen nicht in Frage gestellt worden.

### Mikrobielles Ökosystem der Vormägen

Die mikrobielle Gemeinschaft in den Vormägen wird durch ein hoch komplexes Ökosystem aus Pilzen, Protozoen, Bakterien und Archaeen repräsentiert. Mit dem Einsatz moderner molekulargenetischer Methoden konnte in den vergangenen Jahren insbesondere die Vielfalt der Bakterien genauer charakterisiert werden. Interessanterweise wurde dabei an vielen Wiederkäuerspezies ein sogenanntes „Core Microbiome“ nachgewiesen, das sowohl bei Bakterien als auch bei Protozoen über geographische Bereiche weltweit eine ausgeprägte Ähnlichkeit aufweist [8]. Angesichts einer Bakterienvielfalt von vermutlich weit über 1000 Spezies wird es für künftige Arbeiten eine enorme Herausforderung sein, spezifische biochemische Funktionen des Vormagenstoffwechsels einzelnen Spezies zuzuordnen.

### Biochemie des Vormagenstoffwechsels

Mit der mikrobiellen Besiedlung der Vormägen durch Pilze, Protozoen, Bakterien und Archaeen in den ersten Lebenswochen entwickeln sich im Sinne einer echten Symbiose auch die spezifischen biochemischen Stoffwechselleistungen. Aufgrund des anaeroben Milieus in den Vormägen stehen dabei fermentative Stoffwechselprozesse im Vordergrund. Mit der pflanzlichen Nahrung werden hochmolekulare Zellwandbestandteile aufgenommen. Sie werden unter dem Begriff der Rohfaser zusammengefasst und bestehen chemisch vor allem aus den Polysacchariden Cellulose und Hemicellulosen. Während Cellulose aus Glucosemolekülen be-

steht, die in einer  $\beta$ -glycosidischen Bindung miteinander verbunden sind, handelt es sich bei den Hemicellulosen um Mischpolymere aus verschiedenen Monosacchariden, die ebenso  $\beta$ -glycosidisch miteinander verbunden sind. Diese nicht durch körpereigene Enzyme der Wiederkäuer aufspaltbaren chemischen Bindungen können durch mikrobielle Enzyme der Vormagenmikroorganismen gespalten werden. Dies stellt den ersten Schritt der Kohlenhydratfermentation dar, die über glykolytische Stoffwechselwege letztlich zu den Endprodukten, den kurzkettigen Fettsäuren (SCFA, *short chain fatty acids*) Essigsäure, Propionsäure und Buttersäure führt. Sie liegen in der Vormagenflüssigkeit vor allem in dissoziierter Form als Acetat, Propionat und Butyrat vor und können mit hoher Kapazität über unterschiedliche epitheliale Mechanismen über das Vormagenepithel absorbiert werden und auf diese Weise für zahlreiche intermediäre Stoffwechselwege genutzt werden. So können durch die mikrobiellen Fermentationsprozesse etwa 60–70 Prozent des Energiestoffwechsels des Wirtstieres gedeckt werden. Die neben den pflanzlichen Kohlenhydraten mit dem Futter aufgenommenen Proteine unterliegen ebenfalls umfangreichen mikrobiellen Abbauprozessen. Dabei stellen die einzelnen Aminosäuren nicht das Endprodukt des Proteinabbaus dar, sondern sie werden bis auf die Stufe von Ammoniak und ihr Kohlenstoffgerüst abgebaut. Die Abbaurate von nativen Futterproteinen liegt in einem Bereich zwischen etwa 60 und 90 Prozent. Dies wird jedoch durch eine effiziente mikrobielle Neusynthese von Aminosäuren und damit von Protein kompensiert. Die mikrobielle Proteinsynthese stellt einen essenziellen Teil des mikrobiellen Wachstums der Vormagenmikroorganismen dar, denn die mikrobielle Zellmasse besteht zu etwa 50 Prozent aus Rohprotein. Bei einer mittleren Generationszeit der Mikroorganismen von etwa 20–30 Minuten können so bei hochleistenden Milch-



ABB. 2 Schafe grasen. Hier Heidschnucken in der Lüneburger Heide. Foto: G. Breves.

kühen täglich etwa 2,5 kg Mikrobenprotein synthetisiert werden. Das Mikrobenprotein kann nach Passage in den Dünndarm vom Wirtstier durch körpereigene Enzyme abgebaut und durch intestinale Absorption der Aminosäuren bzw. von Di-/Tripeptiden genutzt werden. Die Bedeutung der mikrobiellen Aminosäuren- bzw. Proteinsynthese wurden bereits in der Mitte des vergangenen Jahrhunderts charakterisiert. So konnten Duncan et al. [9] die Synthese aller Aminosäuren in den Vormägen nachweisen, und Virtanen [10] gelang erstmals der Nachweis, dass Milchkühe, die gereinigte Rationen mit Harnstoff und Ammoniumsalzen als alleinige Stickstoffquelle erhielten, nicht nur überlebten, sondern ein ungestörtes Reproduktionsverhalten aufwiesen und jährliche Milchleistungen über 4000 kg bei normaler Milchzusammensetzung zeigten.

Neben der Neubildung von Mikrobenprotein stellt die mikrobielle Synthese von wasserlöslichen Vitaminen eine weitere herausragende Syntheseleistung dar. So wurde lange angenommen, dass die ruminale Vitaminsynthese den Bedarf des Wirtstieres decken kann. Erst in jüngster Zeit wurde für hochleistende Milchkühe die Notwendigkeit der zusätzlichen Vitaminversorgung über das Futter gezeigt. Pflanzliche Fette sind in der Wiederkäuerernährung eher von untergeordneter Bedeutung, da der Fettgehalt in den



ABB. 3 Rinder grasen. Hier ein schottisches Hochlandrind. Foto: Y. Armbrrecht.



ABB. 4 Ziegen grasen und browsen. Hier eine Aufnahme aus der Dornbuschsavanna in Kenia. Foto: G. Breves.

meisten Pflanzen unter 5 Prozent beträgt. Ungesättigte langkettige Fettsäuren können in den Vormägen mikrobiell gesättigt werden.

### Wiederkäuer und Klimawandel

Im Zuge der weltweiten Auseinandersetzungen zum Klimawandel ist die Methanemission von Wiederkäuern in den Fokus vieler Diskussionen gekommen. Zweifellos werden von Wiederkäuern signifikante Mengen an Methan emittiert. Dabei ist ihr Beitrag zur globalen Methanemission nicht exakt zu quantifizieren. Aus verschiedenen Studien wird den Wiederkäuern ein Anteil von 11–17 Prozent zugeschrieben [11].

Die Methansynthese stellt eine spezifische Leistung der Archaeen dar, sie werden daher auch als Methanogene bezeichnet. Durch den streng an die Pansenmotorik gekoppelten „Ruktus“ gelangen die Pansengase in die Umwelt. Sie bestehen im Mittel zu ca. 65 Prozent aus CO<sub>2</sub> und zu etwa 28 Prozent aus CH<sub>4</sub>. Die Wirksamkeit als Treibhausgas ist für Methan um ein Vielfaches höher als für CO<sub>2</sub>. Für den mikrobiellen Vormagenstoffwechsel stellt die Methansynthese zweifellos einen nützlichen Stoffwechselweg dar, denn durch die Reduktion von CO<sub>2</sub> zu CH<sub>4</sub> werden die Reduktionsäquivalente, die bei den fermentativen Stoffwechselprozessen entstehen, eliminiert. Damit werden der H<sub>2</sub>-Partialdruck im Pansen niedrig gehalten und dadurch mögliche negative Rückkopplungseffekte auf die Fermentationsintensität verhindert. Ein unter dem Blickwinkel der vergleichenden Physiologie interessanter Befund liegt aus Studien zum mikrobiellen Dickdarmstoffwechsel vor. Bezogen auf die im Dickdarm fermentierte organische Substanz ist die Methanbildung deutlich niedriger als in den Vormägen. Der dafür verantwortliche biochemische Mechanismus ist die sogenannte reduktive Acetogenese, die auf der Nutzung von Reduktionsäquivalenten zur Acetatbildung basiert. Einige der Bakterien, die über diesen Stoff-

wechselweg verfügen, sind mittlerweile identifiziert. Sie in den Vormägen anzusiedeln ist bislang nicht gelungen.

Bereits seit mehr als 50 Jahren wird in zahlreichen Forschungsansätzen versucht, die Methansynthese bei Wiederkäuern zu reduzieren. Prinzipiell können diese Verfahren in Fütterungs- und Nicht-Fütterungs-assoziierte Ansätze differenziert werden. Die zahlreichen Verfahren können nicht im Detail dargestellt werden, da dies den Rahmen dieses Artikels sprengen würde.

### Zur Antwort: Klimakiller oder faszinierende Spezies?

Zweifellos leisten Wiederkäuer einen signifikanten Beitrag zur globalen Emission von Treibhausgasen. Dies nur der Emission von CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> zuzuschreiben, hieße die Komplexität von Emissionen aus der Landwirtschaft zu unterschätzen. So tragen durch die Ammoniakemissionen und die Bildung von Lachgas aus Stickstoffverbindungen, die über Gülle ausgeschieden werden, nicht nur Wiederkäuer, sondern alle landwirtschaftlichen Nutztiere zum Treibhauseffekt bei.

Die Faszination und zugleich der hohe Wert von Wiederkäuern ergibt sich aus der Fülle ihrer Merkmale, die sich in der Evolution dieser Tiergruppe entwickelt haben: Die Differenzierung in „Browser“, „Grazer“ und „Intermediate Feeder“ ermöglicht eine optimale Nutzung der verfügbaren Biomasse und ist ein wichtiger Mechanismus zur Standortanpassung. Die Verwertung von Fermentationsprodukten aus nur mikrobiell abbaubaren Kohlenhydraten für eine Fülle von intermediären Stoffwechselprozessen, die Bildung von hochwertigem mikrobiellem Protein und letztlich die Milchbildung dokumentieren den hohen Wert dieser Tiere für die menschliche Ernährung. Die Nutzung und Veredlung von Nährstoffen aus Grünlandregionen tragen zudem zum Erhalt dieser Regionen bei.

Somit sind Wiederkäuer aufgrund ihres Metabolismus, ihrer Bedeutung zum Landschaftserhalt und als Produzenten hochwertiger Lebensmittel nicht nur als äußerst wertvoll, sondern auch als unverzichtbar anzusehen.

### Literatur

- [1] M. Dohrmann, G. Wörheide (2017). Dating early animal evolution using phylogenomic data. *Scientific Reports* 7: 3599, <https://doi.org/10.1038/s41598-017-03791-w>
- [2] T. J. Hackmann, J. N. Spain (2010). Invited review: Ruminant ecology and evolution: Perspectives useful to ruminant livestock research and production. *Journal of Dairy Science* 93, 1320–1334.
- [3] C. M. Janis (1984). Tragulids as living fossils. S. 87–94 in: *Living Fossils*. N. Eldredge and S. Stanley, ed. Springer Verlag, New York, NY.
- [4] R. M. Nowak (1999). *Walker's Mammals of the World*. Vol. 2 6th ed. John Hopkins Univ. Press, Baltimore, MD.
- [5] R. R. Hofmann, D. R. M. Stewart (1972). Grazer or browser: A classification based on the stomach-structure and feeding habits of East African ruminants. *Mammalia* 36, 226–240.
- [6] R. R. Hofmann (1989). Evolutionary Steps of ecophysiological adaptation and diversification of ruminants: a comparative view of their digestive system. *Oecologia* 78, 443–457.
- [7] C. T. Robbins (1995). Adaptation of Ruminants to browse and grass diets: Are anatomical-based browser-grazer interpretations valid? *Oecologia* 103, 208–213.
- [8] G. Henderson et al. (2015): Rumen microbial community composition varies with diet and host, but a core microbiome is found across a wide geographical range. *Scientific Reports* 9, 14567.
- [9] C. W. Duncan et al. (1953). A quantitative study of rumen synthesis in the bovine on natural and purified rations. *Journal of Nutrition* 49, 41–49.
- [10] A. I. Virtanen (1966). Milk production of cows on protein-free feed. *Science* 153, 1603–1614.
- [11] K. Beauchemin et al. (2009). Dietary mitigation of enteric methane from cattle. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources* 4 (No. 035), 18.

*Gerhard Breves,  
Institut für Physiologie und  
Zellbiologie, Stiftung Tierärztliche  
Hochschule Hannover*

## BUCHKRITIK

## Über den Spessart hinaus von Bedeutung

*Wen interessieren schon Weichtiere und dazu noch jene des Spessarts und des angrenzenden Mains? So mögen viele denken, die diesen Titel lesen, umso mehr, wenn sie nicht in unmittelbarer Nähe des Gebietes leben und dort gärtnern, angeln oder wandern. Aber die Weichtiere des Spessarts sind nicht für dieses Gebiet endemisch, sondern werden, abgesehen von einigen Arten, in ganz Deutschland, ja auch in Österreich und der Schweiz und somit also im deutschsprachigen Raum zu sehen und zu finden sein. Blenden wir also die durch den Buchtitel gezogene geographische Beschränkung aus und wenden uns neugierig einer Tiergruppe zu, die uns zwar fast täglich begegnet, aber die gewöhnlich ignoriert und meist als „Schädlinge“ oder „Salatfresser“ abwertend betrachtet und behandelt wird.*

Es sind die Schnecken und die Muscheln als die beiden artenreichsten Vertreter der Weichtiere (Mollusken), denen sich Klaus Kittel in seinem schwergewichtigen Werk widmet. Sie lebten schon vor Jahrmillionen oder leben heute im und am Wasser, über und unter Tage, in Feucht- und Trockengebieten, fern und nah menschlicher Siedlungen. Sie entwickelten Anpassungen an ihren Lebensraum und Lebensformen, die man kennen muss, um sie würdigen zu können und schützen zu wollen.

Diese Kenntnisse vermittelt das von Klaus Kittel verfasste Werk in hervorragender Weise – üppig illustriert durch Farbfotos von lebenden Tieren und deren Lebensräumen und ausführlich beschrieben durch sehr gut lesbare Texte. Wenn keine lebenden Tiere nachgewiesen werden konnten, zeigt Kittel Eigenfunde von Schalen, Museumsbelege und für Arten aus den verschiedenen Zeitaltern Fossilien. Was der Autor auf den knapp 600 durchgehend farblich bebilderten Seiten fotografisch und im begleitenden Text aus jahrzehntelanger Arbeit zusammengetragen hat, ist beeindruckend und verdient höchste Anerkennung – am besten, indem man ein Exemplar des in handwerklichem Druck und mit Fadenbindung versehenen, für knapp 50 Euro wirklich sehr preiswerten, Buches erwirbt.

### Inspirationen für Ausflüge in den Spessart

Tatsächlich hält man dann nicht nur eine Enzyklopädie der Schnecken und Muscheln im Spessart in der Hand, sondern auch eine Inspirationsquelle für (sonn)tägliche Ausflüge zu den vielen Naturschutzgebieten und Naturwaldreservaten, in die Laub-, Misch- und Nadelwälder, die Erlenbrüche, Auwälder, Uferwälder und Weichholzaunen, in die Schluchtwälder und Feuchtgebiete, zu den Trocken- und Magerstandorten, Ackerfluren, Hecken, Streuobstwiesen und in die Weinberge und Siedlungsbereiche mit Ruinen, Burgstätten und alten Mauern im Spessart und an die ihn umspülenden Flüsse Main, Kinzig und Sinn.

Sie alle hat Kittel, oft gemeinsam mit seiner Frau Theresia, bereist und nach Weichtieren durchsucht. Diese Biotope werden, nach einer allgemeinen Einführung in das Buch und einem Abriss zur Historie der Malakologie (Weichtierkunde) im Spessart, jeweils in Text und Bild und mit einer Liste der dort gefundenen Arten vorgestellt. Die folgenden 440 Seiten enthalten Porträts der im Gebiet überlieferten und noch lebenden Schnecken- und Muschelarten, gegliedert in Name, lateinischer Name, Maße, Gefährdungsgrad, Verbreitungstyp, Lebensraum und Ökologie sowie Anmerkungen und

lokale Verbreitung mit einer Spessartkarte. Fotos von den Tieren, von deren Schalen und den Fundstellen runden jedes Artporträt optisch eindrucksvoll ab. Insgesamt 202 Schnecken- und Muschelarten werden beschrieben, und was man dabei erfährt, ist nicht selten überraschend und faszinierend.

### Wahlverwandtschaft – Flussmuschel und Bachforelle

Wussten Sie, dass die Große Flussperlmuschel (*Pseudunio auricularius* SPENGLER 1793) in der Regel getrenntgeschlechtlich ist und dass sich die Weibchen bei Männchenmangel zu Zwittern umwandeln und sich selbst befruchten können? Wussten Sie, dass die Eier in den Kiemen der Weibchen ausgebrütet werden und dass die in das Wasser entlassenen Larven (Glochidien) eine Bachforelle (*Salmo trutta fario*) als Wirt finden müssen, um sich dort für etwa 10 Monate in den Kiemen einzunisten und zu circa 0,5 mm großen Jungmuscheln zu entwickeln? Für diese beginnt mit dem Verlassen der Forelle die Phase des Freilebens.

Mir war nicht bewusst, dass es kaum Sinn macht, Jungtiere der Buntsandstein-Flussperlmuschel (*Margaritifera margaritifera parvula* HAAS 1908; im Spessart ausgestorben, früher Quelle von Flussperlen) in Gewässern auszusetzen, wenn dort nur Regenbogenforellen (*Oncorhynchus mykiss*) und keine Bachforellen als Zwischenwirt für deren Nachkommen leben: Larven der Buntsandstein-Flussperlmuschel nehmen die Regenbogenforellen als Wirt nicht an – so weit kann Evolution Spezialisierung treiben! Oder lehnen die Regenbogenforellen die Flussmuschel-Glochidien ab?

### Ammendienst – Teichmuschel und Bitterling

Dass Bitterlingsweibchen (*Rhodeus amarus*) ihre Eier über eine Lege- röhre in Teichmuscheln (*Anodonta spec.*) ablegen und dort vor Fressfeinden geschützt bebrüten lassen,

sollte bekannt sein. Auch, dass Teichmuscheln an vielen Stellen auf dem Rückzug sind. Aber wussten Sie, dass diese zunehmend durch die – für einen malakologischen Laien und offenbar auch für Bitterlingsweibchen – gleich aussehende Chinesische Teichmuschel (*Sinanodonta woodiana* LEA 1834) ersetzt wird? Diese wird (oft ungenau Teichmuschel genannt) in Gartenzentren für Hausteiche angeboten und von da offenbar verschleppt oder gar faunenverfälschend mit tragischen Folgen ausgesetzt: Im Unterschied zu den einheimischen Teichmuscheln mögen aber Chinesische Teichmuscheln von Bitterlingseiern nichts wissen, spucken diese aus, übergeben sie so schutzlos den Fressfeinden und beeinflussen damit die Bitterlingspopulationen in Deutschland negativ. Hätten Käufer von „Teichmuscheln“ zuvor den „Kittel“ gelesen, hätten sie vielleicht von der Haltung und der Verbreitung dieses Neozoons abgesehen. Es macht die Qualität dieses Buches und seines Autors Klaus Kittel aus, dass solche Zusammenhänge sachlich und nicht politisiert alarmistisch dargestellt werden.

### Liebeszauber der Schnecken

Sex soll angeblich immer zum Verkaufserfolg einer Publikation beitragen. Hierzu bietet das Werk erstaunliche Einblicke und überraschend Interessantes: Über das Balzverhalten von Weinbergschnecken (*Helix pomatia* LINNAEUS 1758) mit aneinander gepressten Fußsohlen und pendelnden Oberkörpern erfuhr man sicher im Heimatkunde- oder Biologieunterricht. Aber wussten Sie auch, dass einer der beiden Sexualpartner irgendwann einen circa 3 cm langen Liebespfeil hervorstößt, der den getroffenen Partner sexuell erregt, worauf dieser mit einem „Gegenschuss“ und/oder Begattungsversuchen reagiert? Einen wahren Liebeszauber mit gegenseitigem Beleckern zur Stimulation veranstaltet der zu den Nacktschnecken



**Weichtiere des Spessarts und des angrenzenden Mains.** Mitteilungen des Naturwissenschaftlichen Museums der Stadt Aschaffenburg – Band 30/2021. Klaus Kittel, Naturwissenschaftlicher Verein Aschaffenburg, 2021, 592 S., 49,80 Euro, ISSN 0939-1944.

gehörende Schwarze Schnegel (*Limax cinereoniger* WOLF 1803). Auf dem Höhepunkt stülpen die 15 bis selten 30 cm langen zwittriggeschlechtlichen Tiere jeweils etwa 10 cm lange Penes aus, die sich kordellartig umschlingen und Spermapakete austauschen, die eingelagert noch monatelang befruchtungsfähig bleiben. Man blickt mit anderen Augen auf die zumeist gehassten Nacktschnecken.

### Stille Stars im Dunkeln

Ein Beispiel für Naturschutz auch für „unbedeutende“, unspektakulär im Dunkel eines Brunnens lebende Tiere gibt Kittel auf Seite 141. Danach wurde in den 50er Jahren des vorigen Jahrhunderts in Klingenberg am Main die Genehmigung zum Bau eines Hauses verweigert, nachdem in umfangreichen Gutachten die in einem Brunnen lebende Population der Brunnenschnecke *Lartetia nollii* (*Bythiosteum acicula* HELD 1838) als so einzigartig und schützenswert befunden wurde, dass „die Wissen-

schaft gegenüber dem Wohnungsbau den Sieg davongetragen“ hat. Der Fundort ging als „Lartetienbrunnen von Klingenberg“ in die internationale Malakologie ein.

### Naturwissenschaftlicher Verein Aschaffenburg

Konservator Wilhelm Noll vom Naturwissenschaftlichen Museum in Aschaffenburg hatte hierzu die im Brunnen lebende (Weich-)Tierwelt 12 Jahre lang, beginnend 1950, untersucht. Kittel, Mitglied im 1878 gegründeten Naturwissenschaftlichen Verein Aschaffenburg, befindet sich also in guter Tradition. Einem aus heutiger Sicht besonders hervorhebenswerten Traditionsbewusstsein haben wir auch Kittels Opus magnum – seine Publikationsliste zählt mehr als 100 wissenschaftliche Arbeiten – zu verdanken:

Das Werk erscheint in der im Jahr 1939 begonnenen Reihe „Mitteilungen aus dem Naturwissenschaftlichen Museum der Stadt Aschaffenburg“ als Band 30 (2021). Dass die Fortsetzung dieser Serie und das Erscheinen dieses Bandes nur unter hohem persönlichem und finanziellem Einsatz des Autors und des Naturwissenschaftlichen Vereins Aschaffenburg möglich wurde, ist ein Zeichen der Zeit mit einem, im Vergleich zu den Gründungsjahren, völlig verändertem Leseverhalten, Verlagswesen und Heimatverständnis.

Umso mehr wünscht der Rezensent allen Beteiligten, d. h. dem Naturwissenschaftlichen Verein Aschaffenburg, dem Naturwissenschaftlichen Museum der Stadt Aschaffenburg, der o. g. Publikationsreihe und ganz besonders natürlich den „Weichtieren des Spessarts und des angrenzenden Mains“ mit ihrem Mentor Klaus Kittel eine gute Aufnahme und eine Verbreitung weit über den Spessart hinaus.

Prof. Dr. Torsten Arndt,  
Koblenz

## AUSSERSCHULISCHE LERNORTE

### Museen und Zoos zu Hause erleben?

Um Besucher/-innen und insbesondere Schüler/-innen auch in Zeiten von Corona die Möglichkeit zu bieten, außerschulische Lernorte zu besuchen, kann man im Frankfurter Senckenberg Naturmuseum virtuelle Live-Führungen buchen. Die Guides werden dabei von einem „Kameramann“ per Handy gefilmt, der auch Fragen des Publikums direkt weiterleiten kann, so dass ein möglichst authentisches Führungserlebnis entsteht. Dies hat die Bildungsforscher der Biologiedidaktik der Goethe-Universität auf den Plan gerufen, die nun untersuchen wollen, welchen Einfluss die originalen Exponate im Vergleich zu den virtuellen Repräsentationen auf das Interesse und damit die Lernwirksamkeit bei Schüler/-innen haben.

Die Corona-Pandemie brachte für Schulen viele Einschränkungen mit sich: Maske tragen, Abstand halten, Wechselunterricht und Home-Schooling. Hinzu kam, dass während des Lockdowns Museen und Zoos über einen längeren Zeitraum geschlossen waren. Und auch nach der Öffnung konnten die meisten Schulklassen diese wichtigen außerschulischen Lernorte wegen der Kontaktbeschränkungen nicht besuchen.

#### Virtuelle Live-Führungen

Das Senckenberg Naturmuseum etablierte aus diesem Grund in den Wintermonaten 2020/2021 virtuelle Live-Führungen, die von vielen Besucher/-innen gerne angenommen wurden. Letztere wurden über ein Videokonferenzprogramm live in das Museum geschaltet und dort von einem Guide geführt. Dabei wurden die Guides von einer zweiten Person mit einer Handykamera gefilmt (Abbildung 1). So konnten sie – ähnlich wie in einer realen Führung – frei agieren, ohne gleichzeitig die Kamera halten zu müssen. Über die Chat-Funktion gab es für Teilnehmende die Möglichkeit, auch direkt und spontan Fragen zu stellen, so dass vergleichbare Interaktionen wie in realen Führungen stattfinden konnten.

Obwohl Schulklassen zunächst nicht als primäre Zielgruppe der virtuellen Führungen im Fokus standen, nahmen deren Buchungen im

Laufe der Pandemie fortwährend zu. Durch einen Zufall wurden die Biologiedidaktiker der Goethe-Universität Frankfurt auf dieses ungewöhnliche Vermittlungsformat aufmerksam. Sie sahen hier die einmalige Chance, diese Art der Vermittlung bei Schüler/-innen hinsichtlich der Wirkungen auf das Interesse an ausgestorbenen und rezenten Tieren zu untersuchen und die Ergebnisse später mit denen von realen Führungen zu vergleichen. Hier war das Senckenberg Naturmuseum ein idealer Kooperationspartner, da sowohl Dinosaurierskelette als auch originalgetreue Nachbildungen und Dermalplastiken rezenter Tiere gezeigt werden.

#### Bildung und Forschung unter Pandemiebedingungen

Die Schulklassen, die dieses Angebot gerne annahmen, wurden jeweils eine Woche vor, direkt im Anschluss und drei Wochen nach der virtuellen Führung befragt. Alle Befragungen konnten digital durchgeführt werden. Neben der Interessenentwicklung stand auch die Auswirkung auf die Verbundenheit mit der Natur im Mittelpunkt der Untersuchung. Erste Ergebnisse zeigen, dass diese besonders bei Schüler/-innen mit geringer Naturverbundenheit gesteigert werden konnte. Ebenfalls eine signifikante Steigerung erfuhr das individuelle Interesse an Tieren direkt nach den Führungen. Die qualitativen Untersuchungen ergaben, dass Schüler/-innen besonders



ABB. 1 Michael Kubi während einer virtuellen Live-Führung im Museum. Foto: Senckenberg Naturmuseum.

von dem ca. 1,5 m langen Schädel des *Tyrannosaurus rex* beeindruckt waren. Dieser befindet sich in über 3 Meter Höhe, so dass er in Führungen vor Ort nicht im Detail betrachtet werden kann. Hier konnte man durch die Nutzung eines Handysticks und die Zoomfunktion einen echten Vorteil der virtuellen Führungen erzielen (Abbildung 2).

Ein ähnlicher Bildungs- und Forschungsansatz wurde im weiteren Verlauf der Pandemie im Zoo Frankfurt verfolgt. Hier standen Giraffen, Nashörner und Pinguine bei den virtuellen Führungen der Schulklassen im Vordergrund. Auch hier sorgte die Kamera für freie Sicht auf die Tiere, ohne dass diese durch andere Besucher behindert wurde (Abbildung 3).

Auf der anderen Seite fehlen in den virtuellen Führungen natürlich das authentische Erlebnis, die besondere Atmosphäre eines naturkundlichen Museums oder eines Zoos und der persönlich-gegenständliche Bezug zu den Ausstellungsstücken und lebenden Tieren. Auch das Gruppenerlebnis einer gemeinsamen Führung geht bei den virtuellen Führungen weitgehend verloren. Schließlich können die Teilnehmenden bei den Realführungen im Unterschied zu den virtuellen



**ABB. 2 Nutzung von Handystick und Zoomfunktion beim T. rex.**  
Foto: Senckenberg Naturmuseum.

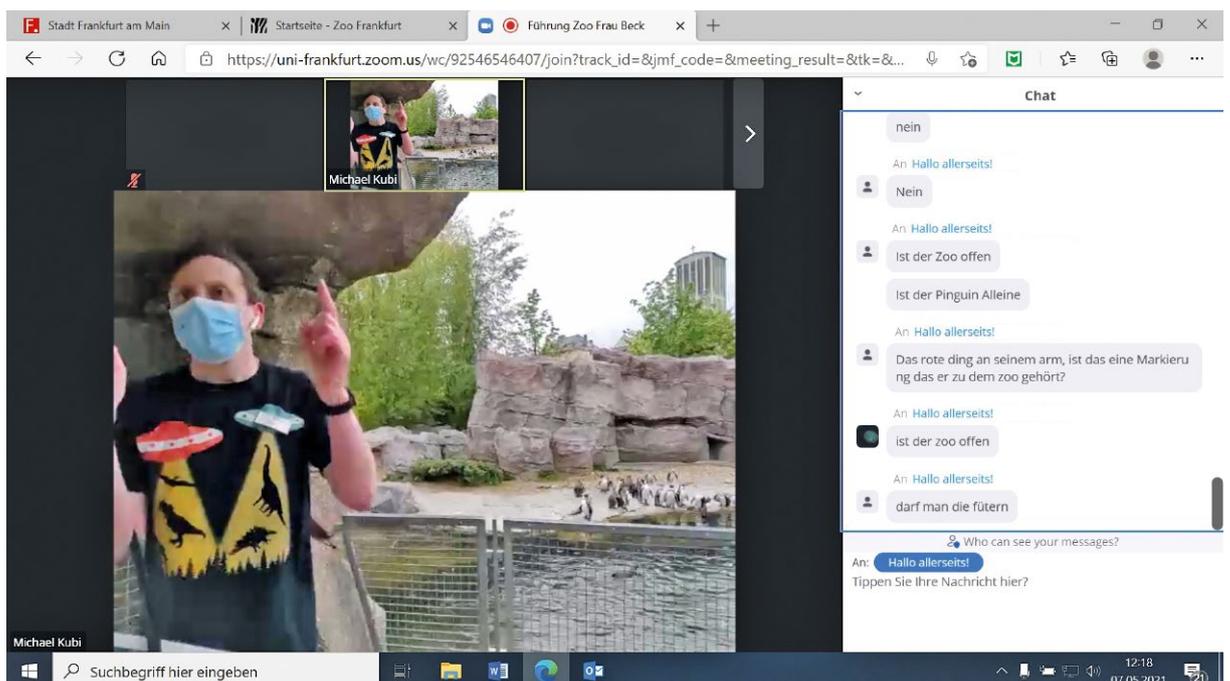
Rundgängen ihre Aufmerksamkeit je nach individuellem Interesse auf andere Details der Exponate richten und sind zudem nicht durch den Kamerafokus beschränkt. Aus der pädagogischen Psychologie weiß man, dass gerade die wahrgenommene soziale Eingebundenheit in die

Gruppe, ebenso wie das Autonomieerleben bei der Interessenentstehung eine große Rolle spielt. Es bleibt abzuwarten, inwieweit sich diese Faktoren auf reale versus virtuelle Führungen auswirken werden.

Können diese der Pandemie geschuldeten, virtuellen „Ersatzange-

bote“ tatsächlich den realen Besuch von Museen, Zoos oder anderen außerschulischen Lernorten ersetzen? Bei den Schüler/-innen war die Antwort jedenfalls eindeutig: Sie würden viel lieber eine „echte“ Führung erleben. Die Gründe sind vielfältig und reichen von der besseren Sichtbarkeit der Tiere bis zur größeren Eigenständigkeit der Kinder. Die virtuellen Führungen wurden nichtsdestotrotz als sehr interessant eingeschätzt und als willkommene Abwechslung im Home-Schooling gerne angenommen. Vielleicht werden virtuelle Führungen in Zukunft auch nach der Pandemie das pädagogische Angebot von einigen außerschulischen Lernorten ergänzen – beispielsweise für Besucher/-innen, denen aufgrund von körperlichen Beeinträchtigungen ein Besuch verwehrt ist oder für Gruppen, für die die Anreise zu weit wäre.

*Michael Kubi & Volker Wenzel,  
Goethe-Universität Frankfurt  
Eva Roßmanith,  
Senckenberg Naturmuseum  
Martina Weiser, Zoo Frankfurt*



**ABB. 3 Screenshot der Führung aus Sicht der Schüler/-innen mit Chat.**

# Ein Ausflug in die Welt der Ilias und Odyssee

## Gift- und Rauschpflanzen in der frühen Antike

MICHAEL WINK



**ABB. 1** Szene aus der Odyssee: Kirke verwandelt die Gefährten von Odysseus in Schweine. Abb.: akg-images.

Die Menschen der Antike kannten viele der Krankheiten und zwischenmenschlichen Konflikte wie wir heute. Die Schilderungen Homers in der Ilias und Odyssee belegen dies sehr eindrücklich. Auch technologischer Fortschritt durch Metallverarbeitung war in der Bronze- und folgenden Eisenzeit überall sichtbar. Schwerter, Messer und Speere aus Bronze sowie schnelle Kampfswagen und Schiffe wurden bei dem Krieg um Troja eingesetzt. Gegen Verletzungen und Krankheiten wurden empirisch meist pflanzliche Heilmittel eingesetzt. Für die Erklärung der Krankheiten und Naturphänomene standen noch keine wissenschaftlichen Erkenntnisse zur Verfügung. Daher wählte man andere, meist mythische Beschreibungen, in denen die Götter eine große Rolle spielten (Abbildung 1). Diese Erklärungen erscheinen uns im Zeitalter der Aufklärung meist sehr bizarr und unverständlich. Wie in diesem Artikel gezeigt, lohnt sich ein zweiter Blick, wodurch sich für manche Sage ein plausibler Zusammenhang ergibt.

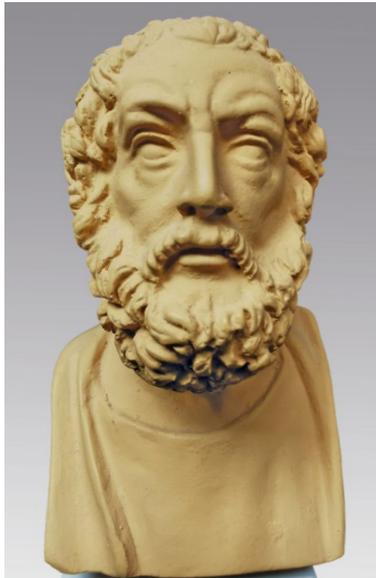
Der moderne Mensch *Homo sapiens* evolvierte im subsaharischen Afrika vor mehr als 200.000 Jahren und wanderte vor mehr als 85.000 Jahren von dort nach Eurasien und Australien. Zuerst wurde offenbar Vorderasien besiedelt. Von dort gab es Ausbreitungswellen entlang des Indischen Ozeans bis nach Australien vor 60.000 Jahren, außerdem nach Asien und danach in die Neue Welt (ab 20.000 Jahren). Europa kam erst vor rund 40.000 Jahren an die Reihe, da große Teile während der letzten Eiszeit unbesiedelbar waren. Die ersten Siedler hinterließen uns zwar viele Kunstwerke (Schnitzereien, Höhlenmalereien), jedoch finden sich von den ersten Siedlern keine genetischen Spuren in den modernen Europäern, so dass man davon ausgehen muss, dass sie ähnlich wie die Neandertaler vor 30.000 bis 20.000 Jahren ausstarben [1, 2]. In Vorderasien, Ostasien und Australien überlebten Jäger und Sammler. Mit Ende der Eiszeit begann vor rund 10.000 Jahren die neolithische Revolution in Vorderasien mit einem Wechsel von der Lebensweise als Jäger und Sammler zur Lebensweise der weniger mobilen Ackerbauern. Vermutlich waren es Bauern aus Anatolien, die Europa besiedelten. In den nächsten 5000 Jahren gab es große kulturelle Fortschritte: Pflanzen und Tiere wurden domestiziert (insbesondere in der Region des Fruchtbaren Halbmonds in Vorderasien), erste Städte und Gesellschaften entstanden. Mit Ende der Jungsteinzeit und beginnender Bronzezeit kamen in Vorderasien und Ägypten die ersten Hochkulturen auf. Archäologische Ausgrabungen aber auch schriftliche Zeugnisse geben uns Einblicke in die Welt der Antike [1, 2].

In diesem Artikel möchte ich der Frage nachgehen, ob die Menschen in der Bronzezeit vor rund 4000 Jahren oder früher bereits die Wirkung von Giftpflanzen und psychoaktiven Pflanzen kannten. In ausführlicher Form haben Monika Niehaus und ich das Thema im Buch „Wie man Männer in Schweine verwandelt und wie man sich vor solch üblen Tricks schützt“ dargestellt [3].

Besonders informativ sind für uns die Sagen des klassischen Altertums [4], insbesondere die Ausführungen von Homer (Abbildung 2), der uns mit der *Ilias* und der *Odyssee* eine besonders wichtige Quelle liefert [5, 6]. Auf den ersten Blick geht es bei Homerischen Geschichten um

Götter, Reisen, Kriege und menschliche Schicksale. In der Antike glaubte man an viele Götter, die jeweils für unterschiedliche Aufgaben, die Naturgewalten und die menschliche Natur zuständig waren. Diese Götter werden mit sehr menschlichen Charakteren beschrieben, die allen Ausschweifungen und Lastern zugetan waren. Im Unterschied zu den Menschen waren die antiken Götter jedoch unsterblich.

Eingebettet in die Schilderungen über Götter, Kriege (insbesondere die Schlachten um Troja), Reisen und Irrfahrten des Odysseus findet man Hinweise, wie die Menschen in der Bronzezeit lebten und wie sie sich ernährten [7]. Damals wurden schon Weizen, Gerste, Hafer, Kichererbsen, Ackerbohnen und Linsen angebaut und Oliven, Feigen, Trauben, Pfirsiche, Mirabellen, Kirschen, Granatäpfel, Äpfel, Birnen, Quitten, Johannisbrot, Walnuss, Kastanie und Mandel als Früchte und Nüsse geerntet. Als Gewürze kannte man Koriander, Lorbeer, Kümmel, Majoran, Thymian, Minze, Fenchel, Dill, Petersilie, Knoblauch und Sesam. Die antiken Quellen beschreiben viele andere Nutz- und Blütenpflanzen, die häufig einem der vielen Göttern geweiht waren [7]. Einige unserer wissenschaftlichen Gattungsnamen erinnern noch heute an diese Zusammenhänge: Die Pfingstrose (*Paeonia officinalis*) galt als Königin der Heilkräuter und war nach dem Heilgott Paion benannt. Die Schafgarbe (*Achillea millefolium*) erinnert an den trojanischen Helden Achill, der die blutstillenden und entzündungshemmenden Eigenschaften dieser Heilpflanzen genutzt haben soll. Die Jagd-



**ABB. 2** Büste des Dichters Homer, der vermutlich im 8. Jahrhundert v. Chr. in Kleinasien geboren wurde. Ob Homer die *Ilias* und *Odyssee* alleine verfasste oder lediglich niederschrieb, was fahrende Sänger übermittelten, kann heute nicht mehr geklärt werden.

göttin Artemis galt als Schützerin der Frauen und Kinder; ihr Name findet sich in der Gattung *Artemisia* wieder, zu der viele Heilpflanzen (z. B. Wermut, *A. absinthium*) gehören. Die Narzisse (Gattung *Narcissus*) trägt ihren Namen nach Narkissos, der sehr eitel war und solange selbstverliebt sein Spiegelbild angeschaut haben soll, bis er verdurstete. [7].

Es ist wohl kaum eine Überraschung, dass Homer auch Gift- und Rauschpflanzen erwähnt. Die diversen Giftpflanzen werden eindeutig beschrieben und sind für uns auch heute noch sofort erkennbar. Anders verhält es sich jedoch bei Rauschpflanzen, die meist mystisch umschrieben werden. Erst auf den zweiten Blick lässt sich erahnen, welche Rauschpflanzen man damals schon kannte und wie man sie nutzte. Kann man diese vagen Beschreibungen, die sehr fantastisch und mystisch klingen, als Biologie rational interpretieren? Man muss sich zunächst darüber klarwerden, dass es sich weitgehend

nur um Beschreibungen von Pflanzen des östlichen Mittelmeerraumes und Vorderasiens handeln kann. Denn nur über diese Region berichtet Homer. Bei den Schilderungen über die Wirkung der Pflanzen benötigt man zunächst eine Idee, um welche Pflanzen es sich gehandelt haben könnte oder welches psychische oder medizinische Phänomen beschrieben wird. Aus der Kenntnis, welche Pflanzen im östlichen Mittelmeer heimisch sind und welche pharmakologisch aktiven ▶ Sekundärstoffe sie enthalten, kann man häufig ableiten, welche Art Homer gemeint haben könnte.

### Pflanzen mit Tropanalkaloiden

Ein Beispiel soll dies erläutern. Schon in der Bronzezeit kamen im östlichen Mittelmeerraum mehrere Pflanzenarten aus der Familie der Nachtschattengewächse (Solanaceae) vor, die psychisch aktive Tropanalkaloide produzieren wie die Alraune (*Mandragora officinarum*) (Abbildung 3) und das Bilsenkraut (*Hyoscyamus niger*, *H. aureus*, *H. albus*, *H. reticulatus*) (Abbildung 4). Die Tropanalkaloide Hyoscyamin und Scopolamin sind ▶ Neurotoxine, welche den Pflanzen als Fraßschutz gegen Herbivore (Pflanzenfresser) dienen [1, 8–10]. Diese ▶ Alkaloide wirken als ▶ Antagonisten am muskarinergen Acetylcholinrezeptor (mAChR); sie verdrängen den ▶ Neurotransmitter Acetylcholin und inhibieren so den Parasympathikus. Dadurch werden glatte Muskeln gehemmt; höhere Dosen führen zum Tod durch Atemlähmung. In niedriger Dosierung wirken die Alkaloide im Gehirn als starke Halluzinogene

Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite 35 erklärt.

### IN KÜRZE

- Schon in der Bronzezeit kannte man diverse Giftpflanzen: Eisenhut, Schierling, Herbstzeitlose und Oleander wurden für **Pfeilgifte, für Morde, zur Selbsttötung und bei Todesurteilen** eingesetzt.
- Das Alkaloid Cyclopamin aus dem Weißen Germer kann als Missbildung ein zentrales Stirnauge hervorrufen und lieferte vermutlich die **Grundlage für die Gestalt des einäugigen Zyklopen Polyphem**.
- Bekannte Rauschpflanzen waren Schlafmohn, Alraune, Bilsenkraut und Mutterkorn mit psychoaktiven Alkaloiden. Der Nepenthes-Trank mit Opium diente dem **Vergessen von Sorgen und Schmerzen**.
- Pflanzen mit Tropanalkaloiden (z. B. Alraune, Bilsenkraut) wurden für Zaubertänke genutzt, z. B. von der Göttin Kirke, welche die **Gefährten des Odysseus in Schweine verwandelte**. Odysseus verzehrte vermutlich die Zwiebeln des Schneeglöckchens (Pflanze Moly) als Antidot.
- Viele **Heilpflanzen der Antike** dienen auch heute noch zur Behandlung von Verletzungen, Entzündungen, Infektionen, Schmerzen und anderen Erkrankungen.



**ABB. 3** Die Alraune (*Mandragora officinarum*) hat eine pfhlähnliche Wurzel (a), Blattrosetten mit daraus emporwachsenden Blüten (b) und runde, ballförmige Früchte (c). Alle Pflanzenteile enthalten Tropanalkaloide.

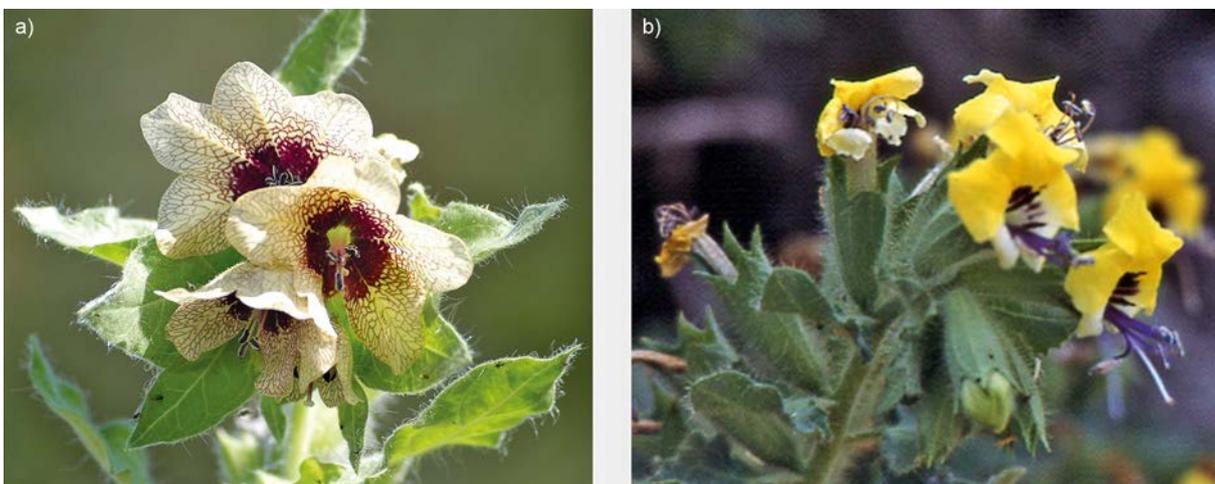
[8, 10]. Nach der Aufnahme der Alkaloide fallen Menschen in einen tiefen traumreichen Schlaf. Erotische Visionen, aber auch die Vorstellung, fliegen zu können oder in ein Tier verwandelt worden zu sein, wurden berichtet. Die Antike kannte offenbar diese Pflanzen und wohl auch deren Wirkung, aber die stoffliche Natur und die zugehörige Pharmakologie war damals natürlich nicht bekannt [8, 10]. Auch für die ekstatischen Exzesse der vermeintlichen Hexen sollen Rauschdrogen, insbesondere Bilsenkraut und Tollkirsche, eine entscheidende Rolle gespielt haben [3, 8, 10].

Homer kannte offenbar Alraune und Bilsenkraut. Er beschreibt die Rauschwirkung der Alraune eindrucksvoll in der Odyssee. Auf seinen Irrfahrten erreichten Odysseus und seine Mannen eines Tages die Insel Aiaia, auf der die Göttin Kirke (oder Circe) lebte. Kirke wird neben Hekate als eine Zauberin beschrieben, die sich besonders gut mit Gift- und Rauschpflanzen auskannte. Die Gefährten erkunden die Insel alleine und treffen auf Kirke. Zur Begrüßung kredenzt Kirke ihnen Wein, den sie offenbar vorher mit

Alraunensaft versetzt hatte. Sobald die Mannen ihn getrunken hatten, berührte sie Kirke mit einem Zauberstab. Darauf wurden die Gefährten in Schweine verwandelt, ein klarer Hinweis auf die psychogene Wirkung von Tropanalkaloiden. Kirke konnte der Sage nach Männer auch in Löwen und Wölfe verwandeln. In der *Odyssee* heißt es:

*Und sie setzte die Männer auf prächtige Sessel und Throne,  
Menge geriebenen Käse mit Mehl und gelblichem Honig  
Unter pramnischen Wein, und mischte betörende Säfte  
In das Gericht, damit sie der Heimat gänzlich vergäßen.  
Als sie dieses empfangen und ausgeleeret, da rührte  
Kirke sie mit der Rute und sperrte sie dann in die Kofen.  
Denn sie hatten von Schweinen die Köpfe, Stimmen und Leiber,  
Auch die Borsten; allein ihr Verstand blieb völlig wie vormals.  
Weinend ließen sie sich einsperren, da schüttete Kirke  
Ihnen Eichel und Buchenmast und rote Kornellen  
Vor, das gewöhnliche Futter der erdaufwühlenden Schweine.*

»Odyssee«, 10. Gesang, Vers 233–243



**ABB. 4** Bilsenkräuter (a, *Hyoscyamus niger*; b, *H. aureus*) produzieren psychisch aktive Tropanalkaloide.



**ABB. 5** Das Schneeglöckchen (*Galanthus nivalis*) produziert mit dem Alkaloid Galantamin einen Acetylcholinesterase-(AChE)-Hemmstoff.

Als Odysseus später seinen Gefährten folgte, begegnete er dem Götterboten Hermes, der ihm riet, vor dem Besuch die Pflanze Moly zu verspeisen. Odysseus folgte dem Rat und entging so dem Schicksal, ebenfalls in ein Schwein verwandelt zu werden. Pharmakologisch muss Moly ein Antidot enthalten, das die Wirkung der Tropanalkaloide aufhebt. Heute wissen wir, dass Inhibitoren der Acetylcholinesterase (AChE) als Antidot bei Tropanalkaloidvergiftung wirken [8, 11]. Schaut man nach AChE-Hemmstoffen in mediterranen Pflanzen, kommt man schnell zu dem Alkaloid Galantamin, das in Schneeglöckchen und Narzissen vorkommt. Dieses Alkaloid wird aktuell in der Alzheimertherapie als AChR-Hemmer eingesetzt. Die Beschreibung in der *Odyssee* deutet eindeutig auf das Schneeglöck-

chen (Abbildung 5) hin. Philologen hatten zuvor lange vergeblich darüber gerätselt, welche Pflanze mit Moly gemeint sein könnte.

*Also sprach Hermeias und gab mir die beilsame Pflanze,  
Die er dem Boden entriss, und zeigte mir ihre Natur an:  
Ihre Wurzel war schwarz, und milchweiß blühte die Blume,  
Moly wird sie genannt von den Göttern. Sterblichen Menschen  
Ist sie schwer zu graben, doch alles vermögen die Götter.*

»Odyssee«, 10. Gesang, Vers 302–306

Die Beschreibung in der *Odyssee* belegt, dass man damals sowohl die berauschende Wirkung der Tropanalkaloide und die Antidotwirkung der Schneeglöckchen-Alkaloide kannte.

### Der Blick in die Zukunft

Schon in der Antike hatten Menschen den Wunsch in die Zukunft zu schauen, insbesondere vor wichtigen Entscheidungen oder bei Katastrophen. Seher spekulierten über die Zukunft, indem sie in Eingeweiden lasen oder den Vogelflug beobachteten. Besser organisiert waren die diversen Orakel. Dort versetzte man junge ungebildete Frauen mit Rauschdrogen (vermutlich Bilsenkraut, Mutterkorn, Lupinen), die ► psychoaktive Alkaloide enthalten, in Trance [8]. Dann wurden die Orakelpriesterinnen befragt. In Trance sollten sie die Wahrheit ungefiltert aussprechen. Ob die Antworten immer gefielen und zutrafen, ist nicht überliefert. Aber vermutlich waren die Prognosen über die Zukunft damals auch nicht viel schlechter als solche, die wir heute über Umfragen oder Hochrechnungen erheben.

### Schlafmohn – Vergessen leichtgemacht

Der Schlafmohn (Abbildung 6) zählt zu den alten Arzneipflanzen und war schon den Sumerern bekannt [8, 11]. Man wusste, dass das aus dem Milchsaft hergestellte Opium ein potentes Mittel gegen Schmerzen war. Vermutlich setzten die antiken Chirurgen bereits Opium und Bilsenkraut als Betäubungsmittel ein. Das im Opium enthaltene Morphin ist ein ► Agonist am Endorphinrezeptor und bewirkt so eine Schmerzstillung. Opium ist aber außerdem auch psychoaktiv und führt zu sorgenfreiem Wohlbefinden; vor allem Sorgen und Ängste werden nachhaltig verdrängt. In der *Odyssee* findet man eine Beschreibung dieses Phänomens: Am Hofe des Odysseus grübelt Telemach über das Schicksal seines Vaters, der seit Jahren vor Troja kämpft. Helena bietet ihm einen Trank (Wein mit Opium oder Opiumextrakt) an, der ihn alles Leid vergessen lassen soll.

*Siehe, sie warf in den Wein, wovon sie tranken, ein Mittel  
Gegen Kummer und Groll und aller Leiden Gedächtnis.  
Kostet einer des Weins, mit dieser Würze gemischt,  
Dann benetzt den Tag ihm keine Träne die Wange,*

Wär ihm auch sein Vater und seine Mutter gestorben,  
Würde vor ihm sein Bruder, sogar der geliebte Sohn, durchs  
Feindliche Schwert getötet, so daß seine Augen es säben,  
Dieses so wundersam wirkende klügl'ich ersonnene Mittel  
Hatte der Helena einst die Gemablin Thons, Polydamna  
Aus Ägypten geschenkt.

»Odyssee«, 4. Gesang, Vers 220–229

Auch die Erdgöttin Demeter betäubt mit Nepenthes (es handelt sich dabei höchstwahrscheinlich um Opium oder Opiumtinktur) ihren Schmerz über den Verlust von ihrer Tochter Persephone, die ihr von Hades entführt worden war. Auch in unserem Kulturraum waren und sind Opium und Morphin bekannte Rauschdrogen, die von bekannten Ärzten, Apothekern und Dichtern konsumiert wurden [3, 8, 11, 14].

### Wein und Alkohol waren schon früh beliebt

Vermutlich kannten schon die Assyrer das Geheimnis der alkoholischen Gärung und stellten Bier und Wein her. Die berausende Wirkung von Alkohol wurde früh erkannt, und alkoholische Getränke waren beliebt und gesucht. Alkohol aktiviert den GABA-Rezeptor. Dadurch werden alle anregenden Neurotransmitter und das Nervensystem in ihrer Wirkung gedämpft [8]. Nach dem Genuss alkoholischer Getränke ist man anfänglich leicht angeheitert, selbstbewusst, gesellig und redselig. Größere Mengen beeinträchtigen Sprachfertigkeit, klares Denken und das Gleichgewichtsgefühl. Ein starker Säufer versinkt häufig in Apathie oder sogar ins Koma [3, 8].

Der Alkoholrausch war in der Antike wohl bekannt: Damals galt Dionysos als Gott des Weines und des ekstatischen Rausches. Bilder zeigen Rauschszenen, in denen Dionysos häufig zusammen mit Satyrn (Wesen mit Pferdeohren und langen Schwänzen) und wilden, gewalttätigen Begleiterinnen (Mänaden) auftritt. Bei Homer gibt es kaum eine Mahlzeit, bei der nicht eifrig Wein getrunken wurde. Weinbau war offenbar bereits in der Bronzezeit im östlichen Mittelmeergebiet verbreitet, und Wein stellte ein wichtiges Handelsgut dar [7]. Bekanntlich haben die Römer bei der Kolonisation Europas nicht auf Wein verzichten wollen und überall, wo es möglich war, Reben angebaut. Unsere heutigen Weinbaugebiete sind offensichtliche Erbstücke früherer römischer Besetzer.

### Antike Giftmischer

In der Antike kannte man eine Reihe von potenten und tödlich wirkenden Giftpflanzen. Die meisten enthalten giftige Alkaloide wie Eisenhut (*Aconitum*), Herbstzeitlose (*Colchicum autumnale*) und Schierling (*Conium*) (Abbildung 7). Eine weitere Gruppe mit stark ▶ toxischen Sekundärstoffen sind Oleander (*Nerium oleander*) und Meerzwiebel (*Drimys maritima*, früher *Urginea maritima*), die Herzglykoside enthalten. Herzglykoside hemmen eine essentielle Ionenpumpe im Körper, die  $\text{Na}^+\text{-K}^+\text{-ATPase}$ .



**ABB. 6** Schlafmohn (*Papaver somniferum*) produziert Milchsaft, der reich an Isochinolinalkaloiden ist, darunter Morphin und Codein.



**ABB. 7** Beispiele für schon in der Antike bekannte Giftpflanzen: a) Eisenhut (*Aconitum napellus*), b) Schierling (*Conium maculatum*), c) Oleander (*Nerium oleander*) und d) Herbstzeitlose (*Colchicum autumnale*).

Ihre Hemmung führt zu einer Blockade der neuronalen Signaltransduktion und zum raschen Tod durch Herzversagen. Extrakte dieser Pflanzen wurden eingesetzt, um Pfeile und Lanzen zu vergiften; weitere Giftkandidaten findet man in [3, 7, 12]. Vermutlich haben schon Jäger und Sammler vergiftete Pfeile und Lanzen zur Jagd und beim Kampf eingesetzt [12, 13]. In der Schlacht um Troja gibt es mehrere Schilderungen, dass Kriegshelden von einem Giftpfeil getroffen wurden und bald darauf verstarben. Ein Antidot kannten die antiken Wundärzte nicht. Sie wussten aber, dass man den Pfeil schnell entfernen, die Wunde großräumig beschneiden und mit blutstillenden und entzündungshemmenden Heilpflanzen behandeln musste.

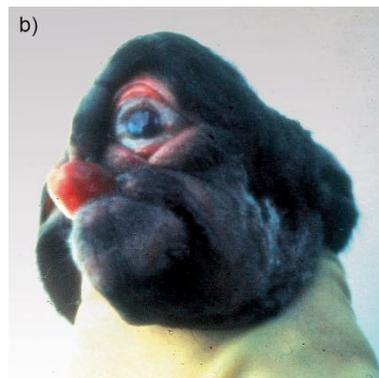
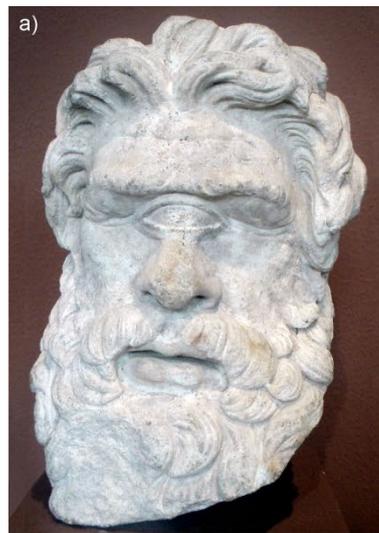
Extrakte aus Giftpflanzen wurden auch verwendet, um Speisen und Getränke zu vergiften. Dies war ein Thema in Ägypten und vor allem im antiken Rom. Die Erzählungen von Vorkostern, die Speisen und Getränke testen mussten, bevor ein Herrscher sie zu sich nahm, sind in der Literatur vielfach beschrieben. Bei Feldzügen vergiftete man Brunnen mit Giftextrakten, vor allem aus Pflanzen mit Tropanalkaloiden (*Hyoscyamus*, *Mandragora*, *Atropa*) und Herzglykosiden (Nieswurz, Gattung *Helleborus*) [12, 13]. Giftpflanzenextrakte, vor allem mit Schierling und Eisenhut, setzte man ein, um Verurteilte ins Jenseits zu befördern [3, 8]. Der wohl berühmteste Gifttod ist der des Philosophen Sokrates, der zum Trinken des Schierlingsbechers verurteilt wurde. Das Hauptalkaloid im Schierling ist Coniin. Coniin greift den nicotinischen Acetylcholinrezeptor an und blockiert dadurch die Signaltransduktion an der motorischen Endplatte von Muskeln und an vegetativen Ganglien. Nach der Einnahme von Schierling tritt eine langsame Lähmung bei vollem Bewusstsein ein. Wenn es schneller gehen sollte, erhielt der Delinquent zusätzlich Eisenhut (*Aconitum*), der als Hauptgift das Diterpenalkaloid Aconitin enthält. Aconitin aktiviert neuronale Natriumkanäle und hemmt dadurch die neuronale und neuromuskuläre

Signaltransduktion. Dies führt zur schnellen Atemlähmung oder zum Herzstillstand [12, 13]. Auch Selbsttötung war in der Antike bekannt; dabei spielten Schlafmohn und Eisenhut offenbar eine wichtige Rolle. Ärzten war es durch den hippokratischen Eid jedoch verboten, bei einem Suizid zu helfen [12–14].

In der Antike kannte man auch Gifte, die über die Haut wirken und zu einem schmerzhaften Tod führen. Extrakte aus den weitverbreiteten Hahnenfußgewächsen, z. B. in der Gattung *Ranunculus*, enthalten das Glukosid Ranunculin. Wird die Pflanze verletzt, entsteht nach enzymatischer Hydrolyse Protoanemonin. Dabei handelt es sich um eine sehr reaktive Substanz, die an Proteine und DNA binden kann. Auf der Haut kommt es zu einer schmerzhaften Entzündung mit starker Hautreizung und Blasenbildung [12, 13]. Wolfsmilchgewächse (Euphorbiaceen) sind im Mittelmeergebiet weit verbreitet. Sie produzieren einen weißen Milchsaft, der Phorbolster in höherer Konzentration enthält. Diese Diterpene aktivieren ein zelluläres Schlüsselenzym, die Proteinkinase C. Der Milchsaft verursacht auf der Haut starke Entzündungen mit Ödem- und Blasenbildung. Innerlich können Protoanemonin und Phorbolster zum Tode führen [12, 13].

Vermutlich wurden Pflanzen mit Ranunculin und Phorbolestern eingesetzt, um kostbare Kleider zu tränken. Solche Kleider übergab man dann als Geschenk und wartete, bis der Träger sie anzog. Da diese Gifte zu starken und schlecht heilenden Hautentzündungen führen, fehlt es nicht an eindrucksvollen Beschreibungen. So erlitt der Held Herakles so starke Schmerzen, als er vergiftete Kleidung (das Nessosgewand) anzog, dass er seine Kameraden bat, ihn lebend zu verbrennen. Dieses Nessosgewand soll nach der Mythologie mit dem Blut des Kentaur Nessos getränkt worden sein. Wenn man die

Symptome des Herakles betrachtet, drängt sich die Vermutung auf, dass zusätzlich hautreizende Pflanzenextrakte verwendet wurden [3, 12].



**ABB. 8** Büste des Riesen Polyphem (a), eines Schafes mit Zyklopie (b) und c) Bild des Weißen Germers (*Veratrum album*).

## Veratrum und Zyklopenauge

In der *Odyssee* wird berichtet, wie Odysseus und seine Mannen auf die Insel des einäugigen Zyklopen Polyphem (Abbildung 8) verschlagen wurden. Sie suchten die Höhle des Zyklopen auf, der mit seiner Schaf- und Ziegenherde unterwegs war. Als er zurückkam und die Griechen bemerkte, ergriff er einige von ihnen und verzehrte sie. Am nächsten Tag versperrte er die Höhle mit einem großen Stein, so dass Odysseus und seine Mannen nicht entkommen konnten. Dieser dachte über eine List nach. Als der Zyklop abends zurückkam, verspeiste er zunächst ein paar Griechen. Dann beschwatzte Odysseus ihn und gab ihm sehr viel Wein zu trinken. Als der Zyklop ins Koma fiel, nahm Odysseus einen angespitzten Pfahl und stach dem Zyklopen das Auge aus. Trotz Erblindung führte Polyphem seine Herde am nächsten Tag aus der Höhle und passte auf, dass kein Grieche sich davonschlich. Odysseus und seine Mannen klammerten sich an das lange Bauchfell der Schafe. Da Polyphem nur den Rücken der Schafe kontrollierte, entkamen die Griechen so der Rache des Zyklopen.

Ist das Bild eines Zyklopen eine reine Fantasie? Inzwischen wissen wir, dass ein zentrales Stirnauge durchaus entstehen kann, wenn ein Transkriptionsfaktor in der Embryonalentwicklung moduliert wird. Interessanterweise gibt es ein natürlich vorkommendes Alkaloid, das diese Wirkung hervorruft und das bezeichnenderweise Cyclopamin genannt wurde. Dieses Alkaloid kommt in einer Pflanze vor, die im Mittelmeergebiet verbreitet ist, dem Germer (*Veratrum album*, Abbildung 8). Extrakte aus

dem Germer und auch das isolierte Cyclopamin rufen bei Vertebraten reproduzierbar ein zentrales Stirnauge hervor, wenn es in frühen Embryonalstadien appliziert wird. Man kann daher annehmen, dass die Menschen der Antike tatsächlich das Phänomen des Zyklopenauges kannten. Aber wie könnte dies zustande gekommen sein? Ziegen und Schafe fressen Germer, wenn keine andere Nahrung vorhanden ist. Vermutlich hatten also Hirten junge Ziegen und Schafe mit einem Stirnauge gesehen (Abbildung 8). Könnte es auch Menschen mit einem Zyklopenauge gegeben haben? Viele Alkaloide gehen nach Resorption in die Milch über [8]. Wenn eine schwangere Frau in den ersten Schwangerschaftswochen regelmäßig solche kontaminierte Milch getrunken hätte, wäre es durchaus möglich, dass sie ein Baby mit Zyklopenauge zur Welt gebracht hätte. Tiere mit einem Zyklopenauge (Abbildung 8) sind durchaus lebensfähig; ob dies auch für Menschen zutrifft, ist eher fraglich.

## Ärzte in der Antike

Bei Homer werden hauptsächlich Wundärzte genannt, die Pflanzen einsetzen, um Blutungen zu stillen, Wunden zu reinigen und zu desinfizieren sowie Entzündungen und Schmerzen zu behandeln. Wichtige Pflanzen waren offenbar die Pfingstrose (*Paeonia officinalis*) und der Kretische Diptam (*Origanum dictamnus*). Kretischer Diptam gilt auch heute noch als Arzneipflanze zur Behandlung von Hautentzündungen und Blutergüssen [15]. Das Wissen um Arzneipflanzen wurde zunächst wohl verbal tradiert. Erst bei den griechischen Ärzten – von Hippokrates

## GLOSSAR

**Agonist:** Pharmakologen bezeichnen Wirkstoffe, die einen Rezeptor aktivieren, als Agonist.

**Alkaloide:** Pflanzliche Sekundärstoffe mit Stickstoff in den Ringstrukturen. Alkaloide ähneln häufig den Strukturen von Neurotransmittern. Sie können an Neurorezeptoren binden, Ionenkanäle modulieren oder Enzyme hemmen, die Neurotransmitter abbauen.

**Antagonist:** Antagonisten hemmen Rezeptoren oder Enzyme.

**Neurotoxine:** Viele Pflanzen produzieren Sekundärstoffe mit neurotoxischen Eigenschaften. Sie dienen den Pflanzen als Schutzstoffe gegen Fraß durch Herbivore.

**Neurotransmitter:** Botenstoffe der Nervenzellen, die benötigt werden, um elektrische Signale weiterzuleiten. Wichtige Neurotransmitter sind Acetylcholin, Dopamin, Noradrenalin, Serotonin, Glutaminsäure und GABA.

**Psychoaktive Alkaloide:** Zu den bekannten psychoaktiven Alkaloiden zählen die Tropanalkaloide (Hyoscyamin, Scopolamin), die Morphinanalkaloide (Morphin, Kodein), Ergotalkaloide (Ergotamin, Ergometrin), Beta-Carbolin-Alkaloide (Harmin), Chinolizidinalkaloide (Cytisin) und Phenylpropylamine (Ephedrin).

**Sekundärstoffe:** Pflanzen produzieren und speichern Mischungen von strukturell unterschiedlichen organischen Molekülen. Diese evolvierten als Abwehrsubstanzen gegen Fressfeinde und Mikroorganismen (Bakterien, Pilze, Viren), aber auch als Signalfstoffe zur Anlockung von bestäubenden Arthropoden (Gliederfüßer) und samenverbreitenden Fruchtfressern (Frugivoren).

**Toxische Sekundärstoffe:** Zu den tödlich wirkenden Alkaloiden zählen Diterpenalkaloide (Aconitin, Protoveratrin), Piperidinalkaloide (Coniin), Colchicin, Indolalkaloide (Strychnin, Gelsemin, Toxiferin I), Isochinolinalkaloide (Tubocurarin) und Steroidalalkaloide (Solanin, Cyclobuxin). Pflanzen mit cyanogenen Glukosiden wie Amygdalin setzen das Atmungsgift Blausäure frei. Cyanogene Glucoside findet man in vielen Vertretern der Rosaceae (Gattung Prunus). Zu den besonders giftigen Terpenen zählen Herzglycoside, Phorbolster und Andromedotoxin. Herzglycoside hemmen die Natrium-Kalium-ATPase, die für den Aufbau von Ionengradienten notwendig ist. Ihre Hemmung führt zu einer Lähmung der Nerven- und Muskelaktivität. Herzglycoside kommen in vielen Pflanzen vor (z. B. Fingerhut, Digitalis; Maiglöckchen, Convallaria; Oleander, Nerium oleander; Gelber Oleander, Thevetia). Extrakte aus diesen Pflanzen wurden für Pfeilgifte verwendet oder direkt für Mord und Selbsttötung eingesetzt.

(460–377 v. Chr.) bis Dioskurides (um 70 n. Chr. geboren) – gibt es genauere Angaben zu den Pflanzen, den Indikationen und sogar zu den Dosierungen. Berühmt sind die Bücher von Dioskurides, der in seiner *De Materia Medica* über 600 Heilpflanzen beschrieb und über 50 Krankheitsbilder unterschied [16]. Viele dieser Pflanzen werden auch heute noch in der traditionellen Medizin und Phytotherapie eingesetzt [8]. Dies zeigt, dass die antiken Heiler sehr gut beobachten konnten und vermutlich durch Versuch und Irrtum zu wirksamen Heilmitteln gelangten, die auch heute noch für uns wichtig sind.

### Zusammenfassung

Homer schildert in den Epen „Ilias“ und „Odyssee“ die Welt der Bronzezeit vor rund 4000 Jahren. Viele Nahrungspflanzen, die wir heute nutzen, waren schon damals bekannt. Auch kannte und nutzte man diverse Gift- und Rauschpflanzen: Eisenhut, Schierling, Herbstzeitlose und Oleander waren berühmte Giftpflanzen, die als Pfeilgifte, für Morde, zur Selbsttötung und bei Todesurteilen eingesetzt wurden. Das Alkaloid Cyclopamin aus dem Weißen Germer kann als Missbildung ein zentrales Stirnauge hervorrufen; diese Folge von Vergiftungen waren vermutlich die Grundlage für die Gestalt des einäugigen Zyklopen Polyphem. Rauschpflanzen wie Schlafmohn, Alraune und Bilsenkraut enthalten psychoaktive Alkaloide. Als Nephentes-Trank diente der Schlafmohn zum Vergessen von Sorgen und Schmerzen, Pflanzen mit Tropanalkaloiden wurden zum Verzaubern genutzt. Die Zauberin und Göttin Kirke verwendete Extrakte aus der Alraune, um die Gefährten des Odysseus in Schweine zu verwandeln. Odysseus kannte den Trick und aß vor dem Besuch der Kirke die Zwiebeln des Schneeglöckchens, welches das Alkaloid Galantamin als Antidot enthält. Noch älter war wohl die Erkenntnis, dass Wein und Bier verlässlich einen Rausch hervorrufen können. Wein spielte bei Homer schon eine große Rolle und fehlte bei keiner Mahlzeit. Die Antike kannte bereits viele Heilpflanzen, die zur Behandlung von Verletzungen, Entzündungen, Infektionen, Schmerzen und anderen Erkrankungen eingesetzt wurden. Einige dieser Pflanzen nutzen wir heute noch in der Medizin: Schafgarbe (*Achillea* sp.), Beifuß (*Artemisia* sp.), Tollkirsche (*Atropa belladonna*), Kamille (*Matricaria chamomilla*), Schöllkraut (*Chelidonium majus*), Mutterkorn (*Claviceps purpurea*), Herbstzeitlose (*Colchicum autumnalis*), Weidenröschen (*Epilobium* sp.), Fenchel (*Foeniculum vulgare*), Nieswurz (*Helleborus* sp.), Bilsenkraut (*Hyoscyamus* sp.), Lavendel (*Lavandula* sp.), Minze (*Mentha* sp.), Myrte (*Myrtus communis*), Pfingstrose (*Paeonia* sp.), Schlafmohn (*Papaver somniferum*), Wegerich (*Plantago* sp.), Granatapfel (*Punica granatum*), Eiche (*Quercus* sp.), Rosmarin (*Rosmarinus officinalis*), Salbei (*Salvia* sp.), Thymian (*Thymus* sp.), Meerzwiebel (*Drimia maritima*), Verbene (*Verbena officinalis*), Mistel (*Viscum* sp.) und Mönchspfeffer (*Vitex agnus-castus*).

### Summary

#### *Poisonous and intoxicating plants in the ancient world*

In the epics “Iliad” and “Odyssey”, Homer describes the world of the Bronze Age around 4000 years ago. Many food plants that we use today were already known at that time. Various poisonous and intoxicating plants were known and used as well: Monkshood, hemlock, autumn crocus, and oleander were notorious poisonous plants used as arrow poisons, for murders, for suicide, and for death sentences. The alkaloid cyclopamine from white hellebore can cause the development of a single eye in the middle of the forehead (cyclopia) as a deformity; this consequence as a result of poisonings was probably the basis for the figure of the one-eyed cyclops Polyphemus. Intoxicating plants, such as opium poppy, mandrake, henbane, contain psychoactive alkaloids. As a Nephentes potion, the opium poppy served to forget worries and pain; plants with tropane alkaloids were used for magic. The sorceress and goddess Kirke used extracts from mandrake to turn Odysseus’ companions into pigs. Odysseus knew the trick and, before visiting Kirke, ate the bulbs of the snowdrop, which contains the alkaloid galantamine as an antidote. The realization that wine and beer can reliably induce intoxication is probably even older; wine already played a major role in Homer’s works and was never missing from any meal. The ancient world already knew many medicinal plants that were used to treat injuries, inflammations, infections, pain and other diseases. Some of these plants we still apply today in medicine, such as Milfoil (*Achillea* sp.), Wormwood (*Artemisia* sp.), Belladonna (*Atropa belladonna*), Chamomile (*Matricaria chamomilla*), Celandine (*Chelidonium majus*), Ergot (*Claviceps purpurea*), Autumn Crocus (*Colchicum autumnalis*), Willow-herb (*Epilobium* sp.), Fennel (*Foeniculum vulgare*), Hellebore (*Helleborus* sp.), Henbane (*Hyoscyamus* sp.), Lavender (*Lavandula* sp.), Mint (*Mentha* sp.), Myrtle (*Myrtus communis*), Peony (*Paeonia* sp.), Opium Poppy (*Papaver somniferum*), Plantain (*Plantago* sp.), Pomegranate (*Punica granatum*), Oak (*Quercus* sp.), Rosemary (*Rosmarinus officinalis*), Sage (*Salvia* sp.), Thyme (*Thymus* sp.), Sea Squill (*Drimia maritima*), Speedwell (*Verbena officinalis*), Mistletoe (*Viscum* sp.) and Chaste Tree (*Vitex agnus-castus*).

### Schlagworte:

Homer, Bronzezeit, Rauschpflanzen, Gifte, Heilpflanzen, Ilias, Odyssee.

### Literatur

- [1] V. Storch, U. Welsch, M. Wink (2013). *Evolutionsbiologie*. 3. Auflage; Springer, Heidelberg.
- [2] D. Reich (2018). *Who we are and how we got here. Ancient DNA and the New Science of the human past*. Oxford University Press, Oxford.
- [3] M. Niehaus, M. Wink (2020). *Wie man Männer in Schweine verwandelt und wie man sich vor solch üblen Tricks schützt*. Hirzel-Verlag, Stuttgart.

- [4] G. Schwab (1976). Die schönsten Sagen des klassischen Altertums, Bd. 1–3, Stuttgart 1838–1840, Nachdruck Leipzig 1976.
- [5] Homer: Ilias und Odyssee, übersetzt von Johann Heinrich Voss, Zürich 1980.
- [6] Homer: Ilias und Odyssee, übersetzt von Roland Hampe, Stuttgart 1979.
- [7] H. Baumann (1999). Die griechische Pflanzenwelt in Mythos, Kunst und Literatur. 4. Aufl., München.
- [8] M. Wink, C. Wink, B. E. van Wyk (2008). Handbuch der giftigen und psychoaktiven Pflanzen. WVG, Stuttgart 2008.
- [9] M. Wink (2015). Vom Pfeilgift bis zum Rauschmittel: Sekundärstoffe – die Geheimwaffen der Pflanzen. *Biologie in unserer Zeit* 4/15, 225–235.
- [10] M. Wink (1999). Wirkung und Kulturgeschichte psychotroper Pflanzen und Drogen, in H. Kiesel (Hg.): *Rausch, Heidelberger Jahrbücher*, 43, 27–90.
- [11] B. E. van Wyk, C. Wink, M. Wink (2015). Handbuch der Arzneipflanzen, 3. Aufl., WVG, Stuttgart.
- [12] L. Lewin (1920). Die Gifte in der Weltgeschichte. Toxikologische allgemeinverständliche Untersuchungen der historischen Quellen. Berlin.
- [13] L. Lewin (1894). Die Pfeilgifte. Eine allgemeinverständliche Untersuchung historischer und ethnologischer Quellen. Berlin.
- [14] L. Lewin (2000). *Phantastica*. Über die berausenden, betäubenden und erregenden Genußmittel. Berlin 1926, Reprint Köln.
- [15] HMPC-Monographie – Kretisches Dostenkraut.
- [16] J. Berendes (1902). Des Pedanios Dioskurides aus Anazarbos Arzneimittellehre in fünf Büchern, übersetzt und mit Erklärungen versehen von J. Berendes. Stuttgart.

### Verfasst von:



Michael Wink studierte Biologie und Chemie an der Universität Bonn, promovierte 1980 und habilitierte 1984 an der Technischen Universität Braunschweig. Als Heisenberg-Stipendiat der DFG arbeitete er von 1986 bis 1988 am MPI für Züchtungsforschung in Köln und am Genzentrum der LMU in München. Von 1988–1989 war er Professor für Pharmazeutische Biologie an der Universität Mainz. Seit 1989 ist er Ordinarius für Pharmazeutische Biologie an der Universität Heidelberg, wo er die Abteilung Biologie am Institut für Pharmazie und Molekulare Biotechnologie leitete. Seit 1.10.19 arbeitet er als Seniorprofessor an der Universität Heidelberg. Seine Arbeitsgebiete reichen von Phytochemie, Arznei- und Giftpflanzen, Pharmakologie, Ornithologie und Naturschutz bis zur Systematik, Phylogenie und Evolutionsforschung. Er ist Autor und Co-Autor von mehr als 20 Büchern und über 1000 Originalarbeiten. Er ist Gastprofessor an Universitäten in China, Thailand, Argentinien und Mexiko, außerdem Mitglied diverser Wissenschaftlicher Beiräte, Herausgeber einiger Zeitschriften und Empfänger mehrerer Auszeichnungen.

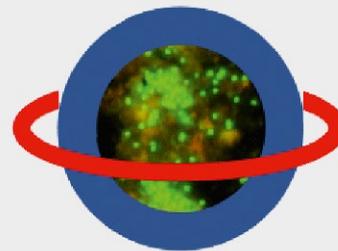
### Korrespondenz:

Prof. Dr. Michael Wink  
Institut für Pharmazie und Molekulare Biotechnologie  
Universität Heidelberg  
INF 329  
69120 Heidelberg  
E-Mail: [wink@uni-heidelberg.de](mailto:wink@uni-heidelberg.de)

## MIKROBEN IM ZOO

Jeder hat schon einmal faszinierende Tiere und Pflanzen in einem zoologischen oder botanischen Garten gesehen. Mikroorganismen hingegen nimmt man normalerweise kaum wahr, obwohl wir alle ständig von Milliarden von ihnen umgeben sind. Der **virtuelle Mikrobiologische Garten** soll Einblicke in die Welt der Mikroben geben, keineswegs systematisch und vollständig, sondern anhand ausgewählter Geschichten, die sich hinter den Fenstern des Eingangsbildes verbergen. Der Mikrobiologische Garten wurde 2003 am Institut für Chemie und Biologie des Meeres (ICBM) der Universität Oldenburg eingerichtet. Bilder und Inhalte dürfen nach Anfrage verwendet werden.

[www.mikrobiologischer-garten.microbial-world.com](http://www.mikrobiologischer-garten.microbial-world.com)



Noch ist er nicht gebaut: MikrobAlpina, der **höchstgelegene Mikrobengarten** der Welt. Aber immerhin eine attraktive Homepage kann das Projekt von Wissenschaftler/-innen an der Universität Innsbruck, der Medizinischen Universität Innsbruck und des Management Centers Innsbruck bereits vorweisen. Diese vermittelt Kindern und Eltern, Schüler/-innen und Lehrkräften sowie Studierenden alles über Mikroorganismen als großartige Helfer für Menschen und Umwelt. Im Vordergrund steht dabei der Nachhaltigkeitsgedanke.

In Zukunft soll die Ausstellung durch kontinuierlich weiterentwickelte Vermittlungsangebote Bildungsaufträge auf allen Ebenen wahrnehmen.

[www.mikrobalpina.org](http://www.mikrobalpina.org)



## Giftevolution in aktiv giftigen Chilopoden

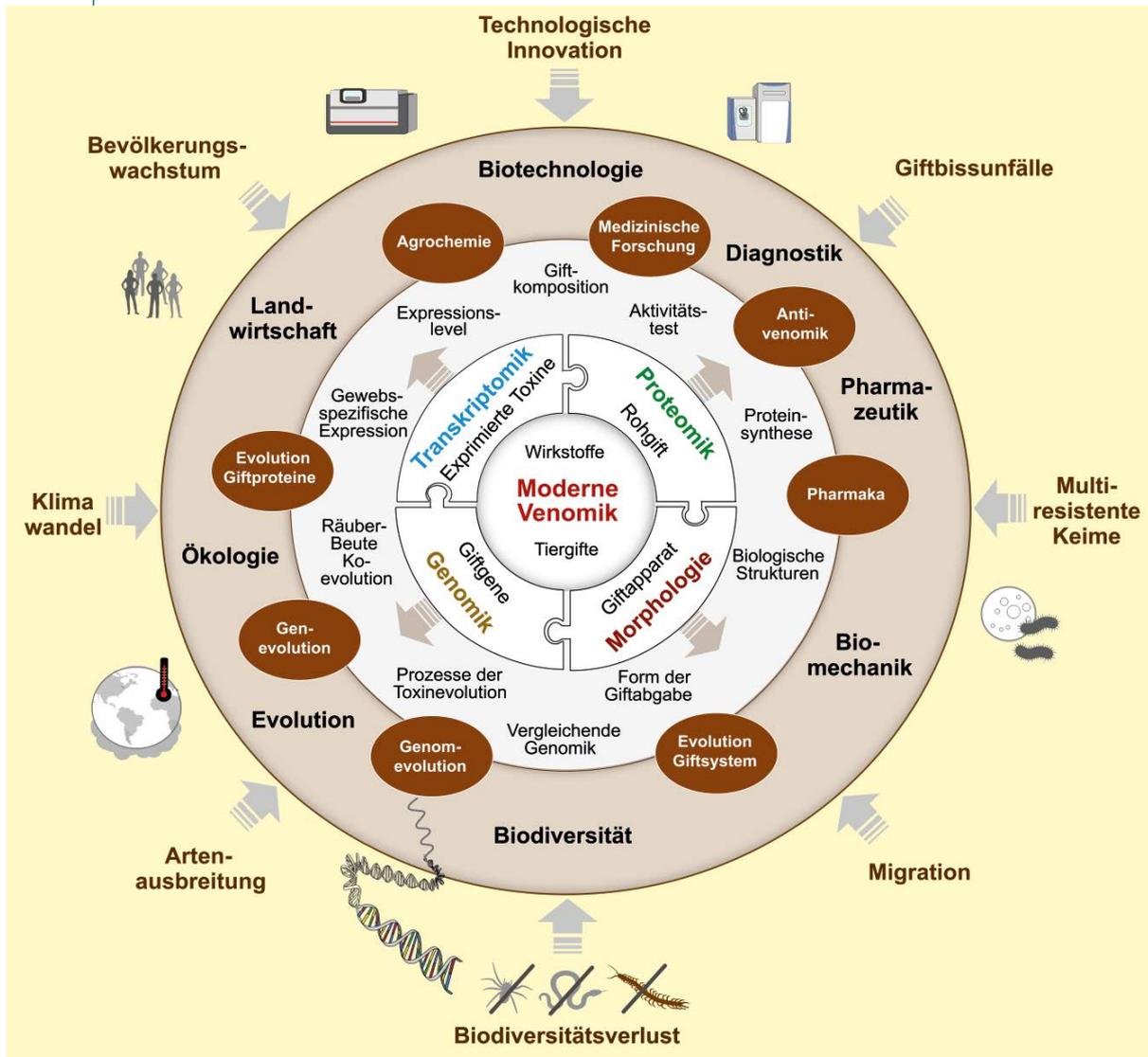
# Die unerwartet diversen Gifte der Hundertfüßer

BJÖRN M. VON REUMONT | NIKOLAUS SZUCSICH | ANDY SOMBKE

*Wussten Sie, dass viele Hundertfüßer (Chilopoda) nicht nur aktiv, sondern auch passiv giftig sind und in über 400 Mio. Jahren Evolution zwei hoch effektive Waffensysteme entwickelt haben? Neue Erkenntnisse der modernen Venomik (Tiergiftforschung) zeigen, dass diese faszinierenden Gliedertiere aus der Gruppe der Vielfüßer ein viel komplexeres und unterschiedlicheres Arsenal an Giften entwickelt haben, als bisher bekannt war. Ein Grund ist vermutlich die Adaption des Giftapparates an sehr unterschiedliche Lebensweisen und Beutetiere. Auch scheinen vielfältige Mechanismen der Entstehung und Anpassung der Peptide und Proteine als Giftkomponenten eine große Rolle zu spielen.*

Gifttiere faszinieren und beeinflussen seit jeher in vielen Facetten wirtschaftliche und kulturelle Aspekte der Menschheit [1]. Ihre Gifte verwenden sie aktiv, indem sie mit einer morphologischen Struktur – ihrem Giftapparat – Gifte in andere Organismen injizieren, um Beute zu erjagen oder sich offensiv zu verteidigen. Im Gegensatz zu den aktiv giftigen Tieren schützen sich passiv giftige Tiere vor Beutegreifern, indem sie Toxine unspezifisch meist über Hautdrüsen absondern, so dass diese einen Angreifer bei Berührung handlungsunfähig machen. Einige Tiergruppen wie zum Beispiel Schlangen, Spinnen und Skorpione sind berüchtigt für ihre aktive Giftigkeit und ausgeklügelten Giftapparate. Durch Klimaerwärmung und Bevölkerungswachstum häufen sich zunehmend ungewollte Zusammenstöße mit Gifttieren, die manchmal zu fatalen Folgen führen. Dadurch entsteht die Notwendigkeit, die Gifte spezifischer Arten zu verstehen, um Gegengifte und Antiseren zu entwickeln. Die im Laufe der Evolution angepasste und oft hochspezifische Wirkung von Proteinen, die als Toxine die Hauptbestandteile von aktiven Tiergiften sind, hat überdies ein Begehren der angewandten For-

ABB. 1 | DAS FELD DER MODERNEN TIERGIFTFORSCHUNG (VENOMIK)



Die vier methodischen Hauptsäulen, um Evolution, Zusammensetzung und Aktivität von Giften und ihren Einzelkomponenten – den Protein- und Peptidtoxinen – zu verstehen, sind Proteomik, Transkriptomik, Morphologie und Genomik. Viele angewandte Forschungsbereiche wie Landwirtschaft, Biotechnologie, Pharmazeutik und Diagnostik schließen an. Abb. Björn M. von Reumont.

schung geweckt [1, 2]. Viele der zum Teil tödlichen Toxine werden in langwierigen Studien getestet, um diese dann biotechnologisch – leicht verändert und optimiert – heilend pharmakologisch, nutzbringend agrochemisch oder klinisch als Medikament, Bioinsektizid oder in der Diagnostik einzusetzen (Abbildung 1) [3].

Im ursprünglichen Ansatz zur Gewinnung und Analyse von Rohgiften werden Gifttiere stimuliert, damit sie (mehr oder weniger freiwillig) ihr Gift in größeren Mengen abgeben. Am bekanntesten ist das etablierte Melken von Schlangen. Hier beißen Tiere kontrolliert durch eine Membran und setzen ihr reines Gift in ein steriles Gefäß ab, welches dann im Labor recht einfach proteomisch untersucht werden kann. Zur Separierung und Identifizierung

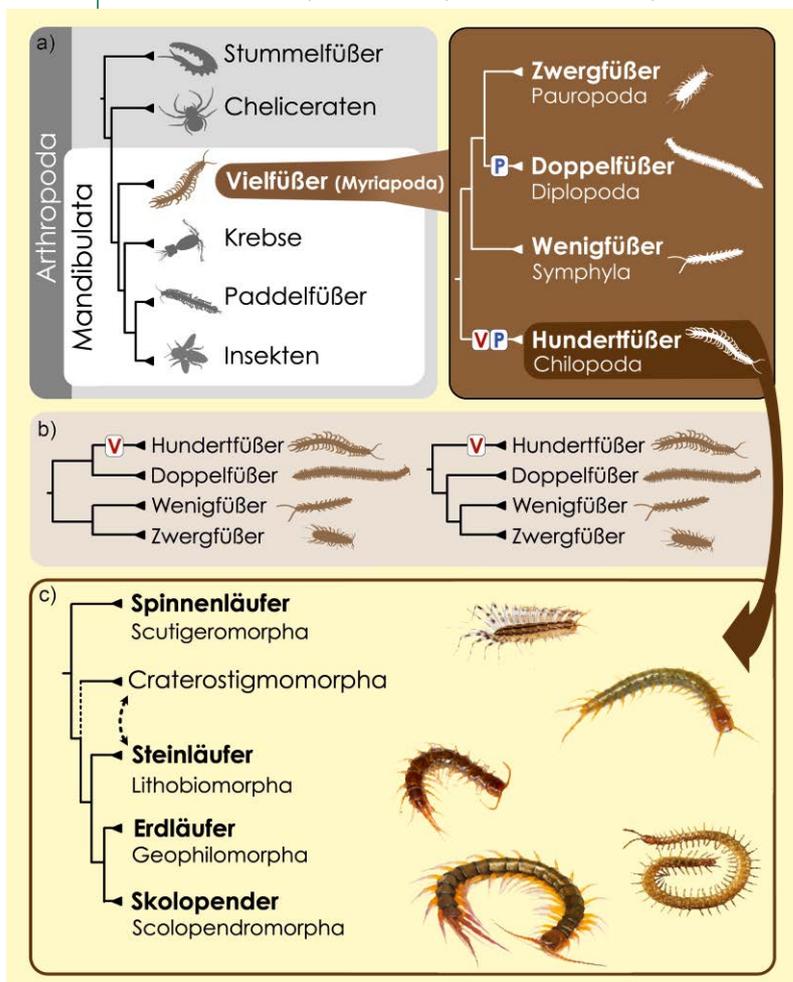
von einzelnen Giftkomponenten (Toxinen) werden diese nach Größe und Ladung durch Gelelektrophorese, Flüssigkeitschromatographie und je nach Fragestellung mittels Massenspektrometrie aufgetrennt. Diese Ansätze funktionieren allerdings bei kleineren Tierarten in dieser Form nur schlecht, da oft keine ausreichenden Giftmengen gewonnen werden [4]. Aus diesem Grund sind lange nur wenige Arten von giftigen Spinnen, Insekten und Hundertfüßern untersucht worden.

Jüngste technologische Entwicklungen in der modernen Venomik schaffen hier nun Abhilfe. Neue Generationen von hochempfindlichen proteomischen Plattformen operieren mit extrem kleinen sekretierten Giftmengen. Parallel sind auch sensitive Technologien etabliert, die es

## IN KÜRZE

- Hundertfüßer sind eine der **ältesten aktiv giftigen terrestrischen Tiergruppen**, die schon vor ca. 400 Mio. Jahren einen Giftapparat besaßen.
- Die **Evolution der Tausendfüßer** (Myriapoda), zu welchen die Hundertfüßer (Chilopoda) gehören, ist noch nicht abschließend aufgeklärt.
- Auch in Hundertfüßern sind **einige Verwandtschaftsbeziehungen noch offen**. Als geklärt kann das Schwestergruppenverhältnis der Scutigeromorpha zu allen anderen Gruppen gelten.
- Neue Erkenntnisse aus der modernen Tiergiftforschung (Venomik) zeigen, dass Vorfahren der Hundertfüßer **vermutlich ein sehr ursprüngliches Gift** zur Jagd nutzen.
- Diese **einfache Giftzusammensetzung besitzen noch die Spinnenläufer**, die Schwestergruppe aller übrigen Hundertfüßer.
- In den **Skolopendern finden wir die komplexesten Gifte** mit zahlreichen spät evolvierten neurotoxischen Peptiden.
- Das unerwartete Ergebnis von neuen Studien ist, dass es **nicht das eine Hundertfüßergift gibt**, sondern verschiedene Arten in den fünf Ordnungen diverse Gifte einsetzen, die stark an ihre Lebensweise angepasst sind.
- **Tatsächlich gibt es keine Toxinfamilie**, die in Arten aus allen fünf Ordnungen gemeinsam vorkommt; die Prozesse, wie die Giftproteine entstehen, **werden noch weiter untersucht**.

**ABB. 2 | DIE EVOLUTIONÄREN VERWANDTSCHAFTSVERHÄLTNISSSE DER HUNDERTFÜßER (CHILOPODA) UND VIELFÜßER (MYRIAPODA)**



**a) Einordnung der Vielfüßer (Myriapoda) innerhalb der Gliedertiere (Arthropoda).** Das Vorkommen von passiven Abwehrgiften der Doppelfüßer, die oft auch als Tausendfüßer bezeichnet werden, ist mit einem blauen P, die aktiven Gifte der Hundertfüßer mit einem roten V hervorgehoben. **b) Alternative Hypothesen der Verwandtschaftsverhältnisse der Vielfüßer insbesondere auf molekularen Daten beruhend [8].** **c) Die zurzeit favorisierten Verwandtschaftsverhältnisse innerhalb der Hundertfüßer.** Noch nicht vollständig geklärt ist die Stellung der Craterostigmomorpha. Abb. Björn M. von Reumont, adaptiert nach [6, 8]. Fotos der Hundertfüßer in c) mit kollegialer Genehmigung von Eivind Undheim.

ermöglichen, im Giftdrüsengewebe exprimierte Giftkomponenten (RNA-Transkripte) zu sequenzieren und zu identifizieren (Abbildung 1). Beide Methoden werden daher aktuell als Standardverfahren oft kombiniert, um Gifte zu analysieren. In diesem proteotranskriptomischen Ansatz werden die RNA-Sequenzen als spezifische Datenbanken genutzt, um Massen der sekretierten Giftproteine und kurzen Peptide aus dem Massenspektrometer den Sequenzen zuzuordnen [1, 3, 4]. Diese modernen Methoden ermöglichen es nun erstmals, auch Gifte aus allen Hundertfüßergruppen, zu welchen sehr kleine und auch seltene Arten zählen, kombiniert auf proteotranskriptomischer Ebene zu analysieren [5].

### Systematik und Evolution der Hundertfüßer

Interessanterweise bleiben die internen Verwandtschaftsbeziehungen zwischen den vier Gruppen der Vielfüßer (Zwergfüßer, Wenigfüßer, Doppelfüßer und Hundertfüßer) eine Herausforderung in der Rekonstruktion der Evolution der Arthropoden. Insbesondere morphologische und molekulare Daten sind teilweise immer noch widersprüchlich [6, 7, 8]. Eine jüngste Studie illustriert, dass molekulare Daten sehr vorsichtig interpretiert werden müssen, da einige Sequenzbereiche verschiedene, sich widersprechende Verwandtschaften unterstützen. In molekularen Sequenzen befinden sich auch immer Signale, die keine evolutionäre Verwandtschaft widerspiegeln. Diese werden erst durch sorgfältige Tests sichtbar [8]. Neben ihrer ungeklärten Stellung innerhalb der Vielfüßer (Myriapoda) ist für die Hundertfüßer (Chilopoda) auch die Verwandtschaft der fünf Untergruppen noch fragwürdig (Abbildung 2).

Innerhalb der Vielfüßer (Myriapoda) sind Gifte bei zwei Gruppen bekannt, den saprophagen Doppelfüßern oder Diplopoda und den räuberischen Hundertfüßern. Von den saprophag lebenden Zwergfüßern (Symphyla) und den nahrungstechnisch noch wenig untersuchten, aber sich wohl primär von Pilzhyphen ernährenden und extrem kleinen Wenigfüßern (Paupoda), ist aktuell kein Gift beschrieben. An dieser Stelle ist es wichtig, sich die eingangs erläuterte funktionale Differenzierung von aktiven und passiven Tiergiften vor Augen zu führen. Beide

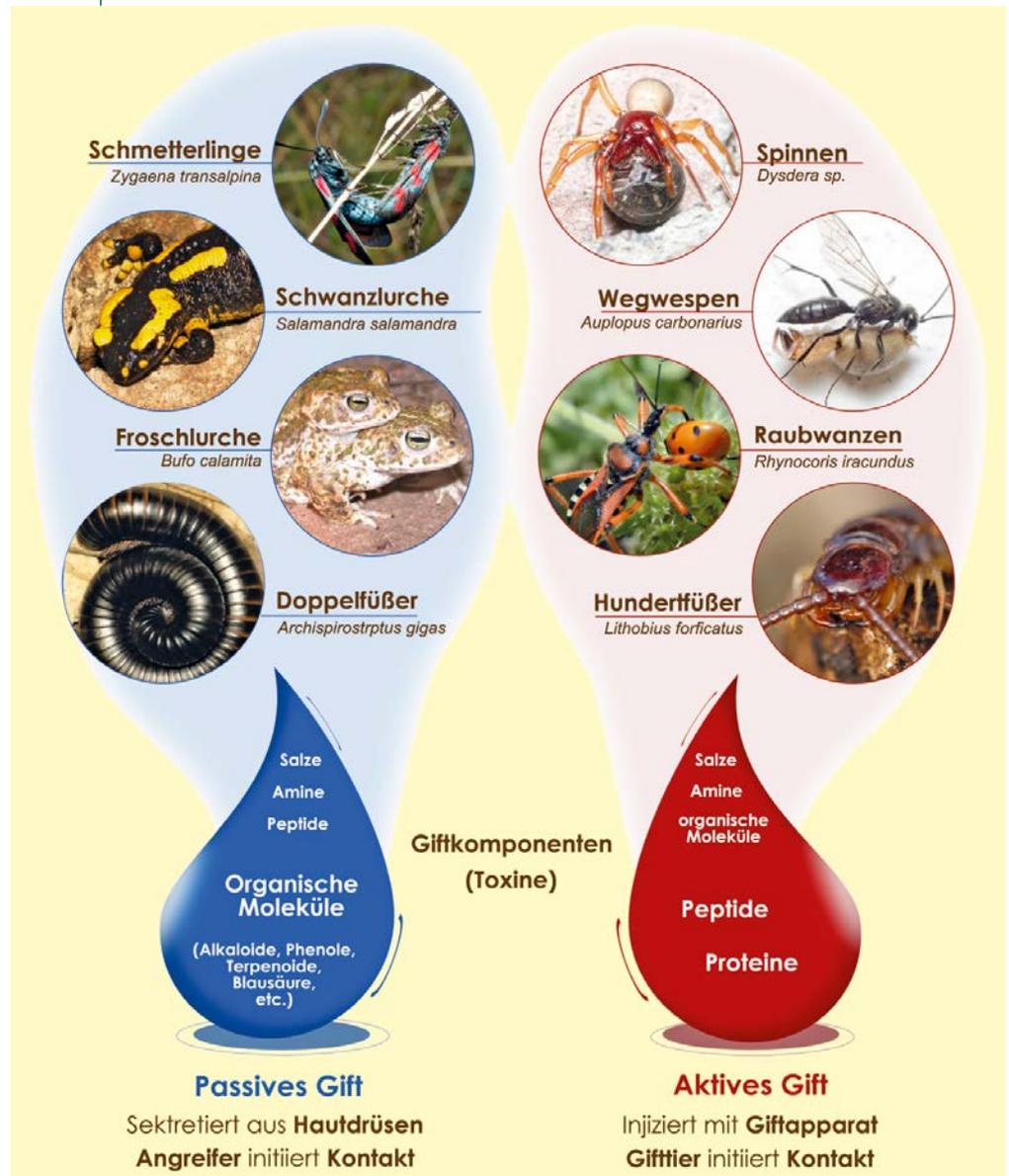
Giftarten kommen in Myriapoda vor, und manchmal treten sie sogar zusammen in einigen Arten auf. Doppelfüßer (Diplopoda) sind passiv giftige Tiere, die typischerweise ihre Toxine in epidermalen Hautdrüsen sekretieren und diese rein defensiv als Schutz oder Abwehr bei Gefahr abgeben. Charakteristisch sind hier niedermolekulare und organische Moleküle wie Alkaloide, Phenole, Ketone oder Blausäure, die als sekundäre Stoffwechselprodukte biosynthetisiert werden (Abbildung 3). Diese kleinen Moleküle wirken effektiv bei Kontakt und diffundieren passiv durch die Haut von Angreifern.

### Hundertfüßer sind aktiv und passiv giftig

Aktiv giftige Arten besitzen im Unterschied zu passiv giftigen Arten morphologische Strukturen, um ihre Toxine über eine Wunde in den Organismus eines Tieres zu injizieren. Die Giftsysteme der aktiv giftigen Arten sind oft extrem komplex und viel komplizierter aufgebaut, als man annimmt. Aus einer Giftdrüse wird der eigentliche Giftcocktail meist mit Hilfe von Muskelsystemen über einen Giftleiter durch eine Struktur wie einen Giftzahn, eine Giftklaue oder einen Giftstachel gepumpt [1]. Diese Struktur übernimmt dann aktiv die Aufgabe, die Haut einer Beute oder eines Angreifers zu durchschlagen und das Gift direkt in den Organismus zum Beutefang oder zur Abwehr zu injizieren [1, 3]. Durch Anpassung im Laufe des Evolutionsprozesses entstanden mechanisch und anatomisch oft unglaublich komplexe Mechanismen. Diese applizieren das Gift direkt in einen Organismus, wodurch als Toxine rekrutierte Peptide und Proteine effizient und wirksam an die Physiologie der Beute oder des Angreifers angepasst sind. Hierbei kommt es oft zu einem regelrechten Wettrüsten (ein sogenanntes *arms race*) durch Koevolution zwischen Abwehrstrategien der Beute und der Giftwirkung des Angreifers.

Bei Hundertfüßern, die alle aktiv giftig sind, hat sich das erste Laufbeinpaar des Körpers in Giftklauen (Maxillipeden) umgewandelt, in welchen sich die Giftdrüsen befinden (Abbildung 4). Entwicklungsbiologisch sind die großen, sekretierenden Giftdrüsen vermutlich aus epider-

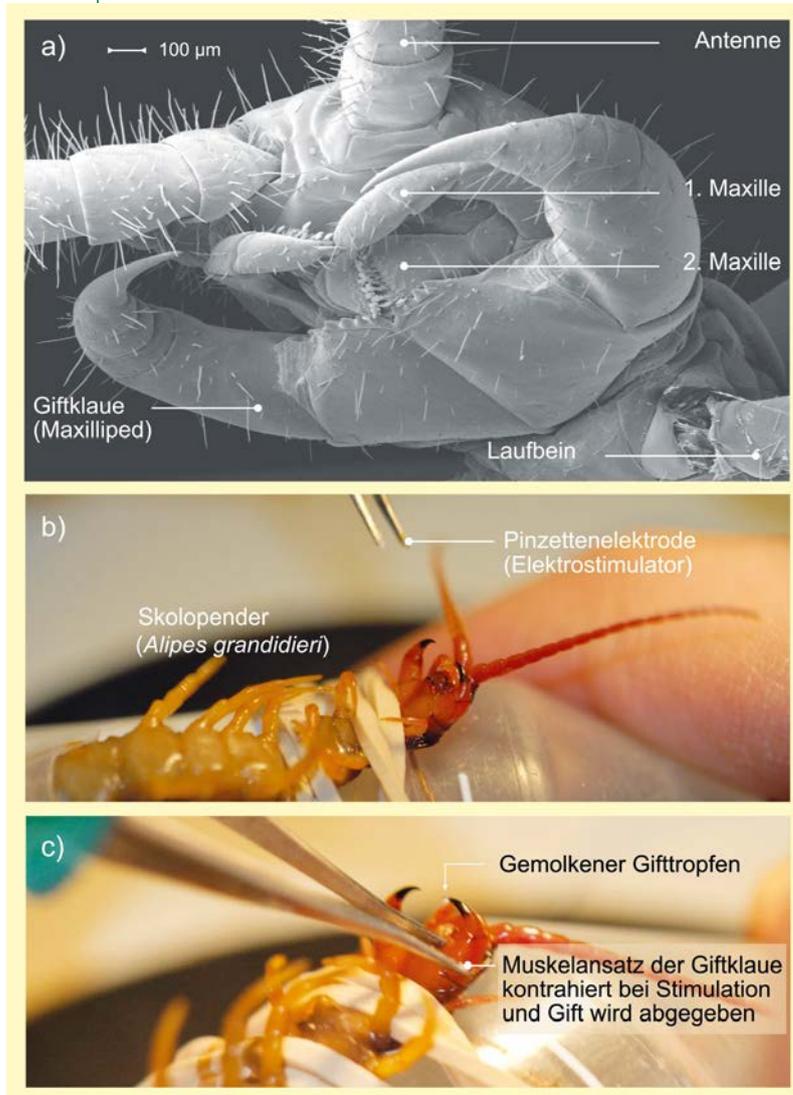
ABB. 3 | UNTERSCHIED VON AKTIVEN (ROT) UND PASSIVEN (BLAU) GIFTEN



Den tropischen Doppelfüßer ausgenommen sind alle abgebildeten Arten in Deutschland und Mitteleuropa heimisch. Passives Gift nutzen Hufeisenklee-Widderchen (*Zygaena transalpina*), Feuersalamander (*Salamandra salamandra*), Kreuzkröte (*Bufo calamita*) und Riesentaufentfüßer (*Archispirostreptus gigas*). Aktiv Gift injizieren Asselspinne (*Dysdera sp.*), hier mit ihrer bevorzugten Beute einer Kellerassel, Wegwespe (*Auplopus carbonarius*) mit Beute, Rote Mordwanze (*Rhynocoris iracundus*) mit Beute und Steinläufer (*Lithobius forficatus*). Fotos und Grafik: Björn M. von Reumont.

malen Hautdrüsen entstanden. Durch Invagination einer Falte des Außenskeletts münden die Poren nicht mehr direkt nach außen und wurden zu einem Teil des Giftapparates umfunktioniert. Aus Fossilfunden können wir zudem ableiten, dass die Umwandlung des ersten Laufbeinpaars in robuste und oft mächtige Giftklauen bereits vor ca. 400 Millionen Jahren stattgefunden hat [1, 9]. Seitdem wurde diese morphologische Struktur als Trägersystem der Gifte in den verschiedenen Hundertfüßergruppen optimiert und in Koevolution mit der Beute an verschiedene

**ABB. 4 | MORPHOLOGIE DES GIFTAPPARATES DER HUNDERTFÜßER UND MELKEN DES GIFTES DURCH ELEKTROSTIMULATION**



Fotos: Andy Sombke (a) und Björn M. von Reumont (b, c).

Lebensweisen angepasst. Eine Klimax ist bei den bis zu 30 cm langen Skolopendern (Abbildung 5) zu sehen, die sehr kräftige Giftklauen mit großen Giftdrüsen besitzen und mit diesen durchaus in der Lage sind, Reptilien, Säugtiere und Vögel zu erbeuten.

Spannend ist zudem, dass einige der ca. 3200 Hundertfüßerarten nach wie vor epidermale Drüsen in ihrer ursprünglichen Form als Abwehrsystem einsetzen – vor allem an den Endbeinen [10], wodurch sie sowohl aktiv als auch passiv giftig sind. Vertreter der Geophilomorpha (Abbildung 5) nutzen zum Beispiel einerseits aktiv ihren Giftapparat zur Jagd und auch zur Verteidigung, andererseits sondern sie aus ihren Bauchdrüsen passiv ein Abwehrsekret aus Klebstoffen und Toxinen ab. Bei näherer Betrachtung macht diese physiologisch kostenintensive Investition evolutionär Sinn, da die Giftklauen gegen zahl-

reiche kleinere Angreifer, wie zum Beispiel einen Trupp Ameisen, bei einem langgestreckten Körperbau nicht sehr effektiv eingesetzt werden können, um sich selber oder das Gelege mit Nachkommen zu verteidigen.

**Gifte evolvieren extrem unterschiedlich in den Hundertfüßergruppen**

Gifte stellen ein ideales Modellsystem dar, um die Anpassung von komplexen, voneinander unabhängigen Merkmalen auf morphologischer und molekularer Ebene sowie die Rekrutierung und Adaption von Proteinen und Proteinfunktionen zu Toxinen zu untersuchen [2]. Allerdings ist durch den bisherigen Fokus auf wenige giftige Tiergruppen unser allgemeines Verständnis und generelles Wissen sehr unvollständig. Dies betrifft die Biologie von Gifttieren und die Diversität ihrer Gifte und Prozesse, durch welche die unterschiedlichen Toxine entstehen, sich zusammensetzen und sich anpassen. Da sich die diversen Gifte in Tieren konvergent (unabhängig voneinander) entwickelten, sind detailliertere und vergleichende Studien von Giften aus verschiedenen, vor allem bisher wenig untersuchten Arten entscheidend, um die Prozesse der Giftevolution besser zu verstehen [1, 11]. Oft zeigt sich nach Studien von vormals nicht untersuchten Gruppen ein anderes oder neues Bild der Giftevolution.

Über längere Zeit sind primär Skolopender (Scolopendromorpha) als eine der fünf Ordnungen der Hundertfüßer untersucht worden. Ein Grund dafür ist, dass sie durch ihre Größe einfacher zu handhaben sind. Ihr Gift ist damit leichter für proteomische Untersuchungen zu gewinnen und parallel kann ausreichend Giftdrüsen-gewebe zur Sequenzierung der exprimierten Protein-vorläufermoleküle (RNA-Transkripte) isoliert werden [5]. Erst relativ spät wurden Gifte von Vertretern aller fünf Ordnungen in einer Studie miteinander verglichen, was auch erst durch die neuen Entwicklungen der modernen Proteom- und Transkriptomtechnologien ermöglicht wurde. Die Ergebnisse dieser proteotranskriptomischen Analysen zeichnen ein unerwartet diverses Szenario der Giftevolution innerhalb der Hundertfüßer [5]. Im Gift der Hundertfüßer finden wir auf Proteomebene (im Rohgift) eine Zusammensetzung aus fast 100 verschiedenen Toxin-gruppen aus Proteaseinhibitoren, Enzymen, porenbil-denen Proteinen (Beta-PFTx), zahlreichen cysteinreichen sekretorischen Proteinen, überwiegend cysteinreichen neurotoxischen Peptiden und diversen neuen Familien [5]. Von den neu beschriebenen Toxinen waren 14 vorher in Hundertfüßern unbekannt. Neun Toxine waren gänzlich unbekannt und wurden bisher nur in Hundertfüßern identifiziert. Dass wir also nicht von einem oder dem charakteristischen Gift der Hundertfüßer sprechen können, war folglich eine unerwartete und neue Erkenntnis. Es gibt überraschenderweise keine Toxinfamilie, die in allen Ordnungen der Chilopoda vorkommt. Auch haben alle untersuchten Arten der fünf Ordnungen eigene, sehr unterschiedliche Giftprofile [5].

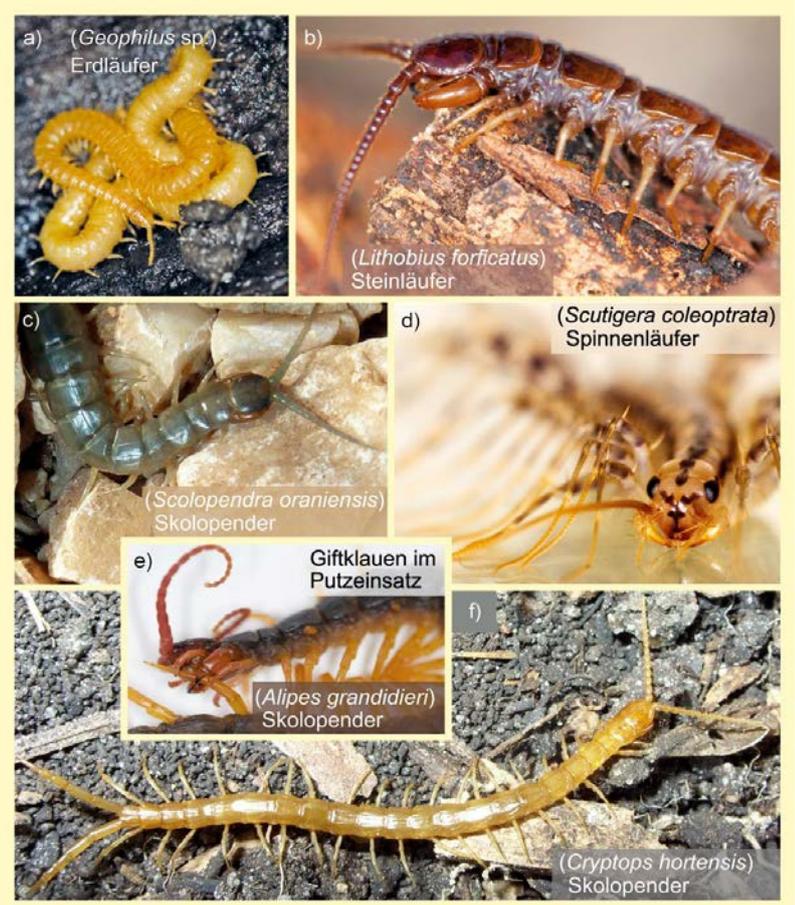
Die simpelsten Giftzusammensetzungen in Hundertfüßern weisen mit acht bzw. 12 Toxinfamilien die Spinnenläufer (Scutigermorpha) auf. Innerhalb der Erdläufer (Geophilomorpha) wurden ebenfalls nur 12 Toxinfamilien identifiziert. Bezogen auf die Anzahl verschiedener Toxine und zugehöriger Proteinfamilien sind die Gifte der Skolopender mit fast 50 verschiedenen Toxinfamilien die komplexesten [5]. Interessanterweise spiegelt sich dieses Bild auch morphologisch wider. Die Struktur der Giftdrüse bei Skolopendern zeigt in neu entwickelten MALDI-Imaging-Untersuchungen einerseits, welche massenspektrometrisch und räumlich (spatiale) heterogene Expression von Toxinen in der Drüse vorliegt, und andererseits aber auch, dass die Drüsen funktional unterteilt sind, um damit in unterschiedlichen Bereichen verschiedene Giftproteine zu sekretieren [12]. Auch aus anderen Studien mehren sich die Hinweise, dass in vielen Gifttiergruppen die Gifte nicht homogen produziert, sekretiert und injiziert werden. Viele Tierarten wie Kegelschnecken, Raubwanzen, Skorpione oder Schlangen sind in der Lage, den Giftcocktail gezielt zu modulieren und der Situation entsprechend (zum Beispiel zur Verteidigung oder zur Jagd) dynamisch zu adaptieren [13].

### Ursprünglich simple Gifte werden durch Anpassung an Beute komplexer

Durch vergleichende Analysen zur Sequenzevolution der Giftproteine in allen fünf Ordnungen ist es möglich, ursprüngliche Zustände von Aminosäurepositionen und die wahrscheinliche Giftzusammensetzung des gemeinsamen Vorfahren der heutigen Hundertfüßer zu rekonstruieren [5]. Dabei ist es wichtig, auch die Proteinvarianten mit einzubeziehen, die (noch) keine toxische Funktion besitzen und im normalen Körpergewebe andere Aufgaben wahrnehmen [5, 11]. Aus diesen werden die toxischen Varianten rekrutiert, indem sich durch molekulare Prozesse ihr Expressionsort in die Giftdrüse verlagert.

Ursprüngliche Hundertfüßer besaßen wahrscheinlich einen einfachen Giftcocktail aus zwei Enzymen (aus den Familien GH18 und Metalloproteinase M12B), Proteinen der vermutlich porenbildenden Familie beta-PFTx und cysteinreichen Proteinen der CAP-Familie. Funktional macht diese Zusammensetzung Sinn, obwohl noch keine guten Daten zur Bioaktivität der meisten Hundertfüßertoxine vorliegen. Von der bekannten Aktivität sequenzähnlicher Giftproteine aus anderen Arten kann jedoch ein wahrscheinliches Szenario der Giftwirkung postuliert werden [5]. Viele CAP-Proteine sind von anderen giftigen Tierarten bekannt und wirken neurotoxisch. Dies gilt vermutlich auch für die porenbildenden beta-PTFx-Proteine, die wahrscheinlich ähnlich wie Latrodotoxine der schwarzen Witwen (*Latrodectus* sp.) neurotoxisch wirken. Die beiden genannten Enzyme zersetzen primär Gewebe. Der Urahn der Hundertfüßer ergriff also Beute und lähmte sie mit den neurotoxischen Komponenten. Die Enzyme sorgten dafür, dass die Gewebestrukturen in der Beute bereits

ABB. 5 | VERTRETER DER VERSCHIEDENEN HUNDERTFÜßERARTEN



Fotos: Björn M. von Reumont (a–e) und Andy Sombke (f).

zersetzt wurden, damit dann die verflüssigte Nahrung besser vertilgt und verdaut werden konnte.

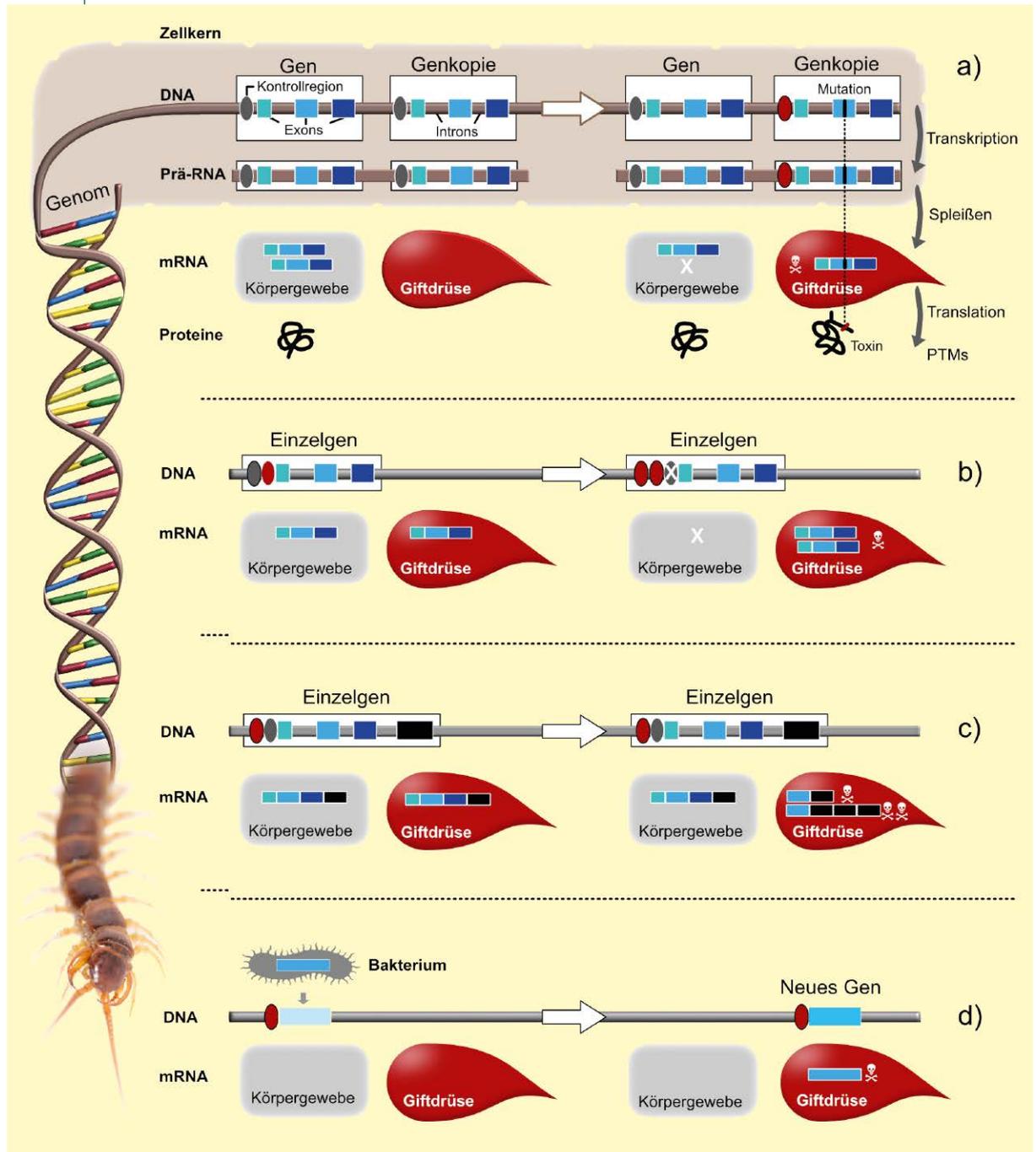
Diese recht einfache Giftzusammensetzung finden wir heute noch in den ursprünglichsten lebenden Hundertfüßern, den Spinnenläufern. Zusätzlich sind bei den Spinnenläufern weitere Toxine rekrutiert worden, vor allem die für diese Gruppe charakteristischen Scutigeroxine (SCTX02) sowie Toxine der Familie SLPTX01 [5]. Diese tauchen später konvergent auch in den Skolopendern auf. Die zwei bisher beschriebenen Spinnenläufergifte unterscheiden sich in der Anzahl der Toxinfamilien. Insofern kann es durchaus sein, dass sich unser Bild von den Giften der Spinnenläufer verändert und detaillierter wird, wenn Gifte weiterer Arten untersucht werden. Dies gilt auch für die Lithobiomorpha und vor allem für die Geophilomorpha und Craterostigmomorpha; von letzteren sind nur recht simple Giftkompositionen beschrieben [5].

Die bemerkenswerte Diversität der komplexen Skolopendergifte geht mit zahlreichen neuen Toxinen einher, die in die Giftdrüsen der Hundertfüßer rekrutiert werden [5]. Diese Evolution neuer „Giftgene“ erfolgte bei gleichzeitigem Verlust der ursprünglichen Giftgene, die aus den anderen Hundertfüßergruppen bekannt sind. Diese Anpas-

sung der Gifte der Skolopender ist vermutlich eine Adaption an die Erweiterung des Beutespektrums – bis hin zu Wirbeltieren. Um diese effektiver zu erbeuten, sind die cysteinreichen, kurzen Neurotoxine von essentieller Bedeutung, was eine positive Selektion und Diversifikation dieser Familien zur Folge hat. Da ihre Neurotoxine auch Io-

nenkanäle von Wirbeltieren angreifen, waren primär Skolopender in der angewandten Forschung im Fokus. Ihre Neurotoxine können spezifisch auf verschiedene Ionenkanäle von Wirbeltieren oder Wirbellosen wirken, womit sie für die Pharmakologie oder Agrochemie in ihrer Wirkweise und Zielmolekülspezifität von großer Bedeutung sind.

**ABB. 6 | ENTSTEHUNG UND EVOLUTION VON GIFTGENEN UND TOXINPROTEINEN AUF GENOMISCHER EBENE**



Exons sind die in der genomischen DNA vorhandenen, kodierenden Genabschnitte, die beim Spleißen herausgeschnitten und zum Gen zusammengesetzt werden; Introns enthalten keine Information für Proteine. Auf Proteinebene werden die Aminosäuresequenzen noch oft durch posttranslationale Modifikationen (PTMs) verändert: a) Genduplikation, b) Einzelgenanpassung, c) alternatives Spleißen, d) horizontaler Gentransfer. Abb: Björn M. von Reumont.

## Molekulare Prozesse der Evolution von Giftproteinen in Hundertfüßern

Die Entstehung von Giften und die Evolution von Toxinen in Hundertfüßern erfolgen auf verschiedenen Ebenen durch diverse molekulare Mechanismen, die so auch in anderen Gifttieren ablaufen (Abbildung 6). Grundsätzlich wird ein Protein zu einem Toxin, indem sich sein ursprünglicher Expressionsort in verschiedenen anderen Geweben zur Aufrechterhaltung des Körperhaushaltes in die Giftdrüsen verlagert. Wir sprechen dann von einer Rekrutierung von Toxinen in den Giftapparat. Diese Rekrutierung erfolgt auf genomischer Ebene, indem die Kontrollregion, welche für den Expressionsort im Genom kodiert, verändert wird oder mutiert. Oft geschieht das durch Duplikation eines ganzen Gens (Genduplikation, Abbildung 6a), wodurch Multigenfamilien entstehen. Wenn nur Genabschnitte mit der Kontrollregion dupliziert werden, wird ein Einzelgen in verschiedenen Geweben exprimiert. In letzterem Fall werden diese Einzelgene dann in der Giftdrüse exprimiert und als Toxine angepasst, wobei oft ihre Expression im Körpergewebe verloren geht (Abbildung 6b). Die zugrundeliegenden genomischen Prozesse sind in vielen Aspekten noch unklar, da erst seit kurzem mehr Genome von Gifttieren sequenziert werden und die vergleichende Genomik methodisch eine zunehmende Bedeutung auch in der Venomik erfährt [11].

Eine zweite Ebene, in der Giftproteine evolvieren, ist der als Spleißen bezeichnete Prozess, in welchem nach der Transkription aus Prä-RNA-Molekülen Introns herausgeschnitten werden. Auf diese Weise werden verschiedene Exons (kodierende Sequenzbereiche des Genoms) des vom Genom translatierten Genabschnittes zu mRNA-Molekülen zusammengesetzt. Durch alternatives Spleißen, bei welchem Exons unterschiedlich in einer mRNA kombiniert und zusammengesetzt werden, entstehen somit neue Toxine, die zum Beispiel eine verstärkte Wirkung erhalten können, wenn für die Wirkung verantwortliche Domänen in Form von Exons mehrfach eingebaut werden (Abbildung 6c). Diese Multidomänenproteine sind insbesondere bei Gifttieren wenig untersucht und scheinen eher seltener vorzukommen. Bisher sind sie bei Schlangen bekannt, wurden jedoch auch schon bei Skolopendern beschrieben [14]. Es gibt noch zahlreiche andere posttranslationale Modifikationen (PTMs), die wir hier aber vernachlässigen. Durch PTMs werden primär bestehende mRNA-Moleküle oder Proteine verändert, um eine optimale Faltung zu gewährleisten.

Gänzlich neu sind Hinweise, dass bei Hundertfüßern horizontaler Gentransfer eine bedeutendere Rolle für die Entstehung von Toxinen spielen könnte [15]. Erste Analysen zur Evolution von Toxinsequenzen zeigen, dass zahlreiche identifizierte Toxine extrem ähnlich zu Sequenzen von Bakterien und Viren sind und horizontal aus diesen Organismen ihren Weg in Hundertfüßergenome fanden

(Abbildung 6d). Einige dieser Sequenzen wurden auch im Genom von *Strigamia maritima* identifiziert, der bislang einzigen sequenzierten Hundertfüßergenomsequenz. Bisher ist horizontaler Gentransfer nur in wenigen Fällen bei Gifttieren gesichert nachgewiesen, zum Beispiel bei parasitoiden Wespen und Nesseltieren [11]. Eine spannende Fragestellung in der Zukunft wird es sein, diese spezielle Entstehung von Toxinen in Hundertfüßern auf Basis von zukünftig sequenzierten Genomen weiter zu testen. Auch die Frage, ob wir unser Bild zur Giftevolution in diesen außergewöhnlichen Arthropoden mit neuen Daten bisher nicht untersuchter Arten verfestigen oder aber revidieren müssen, macht den Reiz aus, an den Giften in dieser Gruppe (weiter) zu forschen.

### Zusammenfassung

*Jüngste Erkenntnisse aus der modernen Tiergiftforschung zeigen, dass die Vorfahren der Hundertfüßer vermutlich ein recht simples Gift mit wenigen neurotoxischen Komponenten und Enzymen besaßen. Dieser Giftcocktail wurde im Laufe der Evolution unerwartet stark verändert und an die heutige Lebensweise der Hundertfüßer angepasst. Tatsächlich gibt es keine Toxinfamilie, die in den Giften der untersuchten Arten aller fünf Ordnungen gemeinsam vorkommt, und damit gibt es auch nicht das eine Hundertfüßergift. Die Klimax sind die extrem diversen Gifte der Skolopender, die zahlreiche neue Neurotoxine beinhalten. Die Prozesse, wie die Giftproteine in den Hundertfüßern entstehen und evolvieren, sind hier durch neue Studien beleuchtet. Erste Daten zeigen, dass auf genomischer Ebene sogar horizontaler Gentransfer eine Rolle spielen könnte.*

### Summary

#### *The unexpected diverse venom evolution in centipedes*

*Recent studies in the field of modern venomics illustrate that the ancestors of today's centipedes presumably had a rather simple venom cocktail at their disposal with few neurotoxic components and enzymes. In the course of evolution, this venom cocktail has experienced unexpected changes with diverse adaptations to centipede lifestyles – a development that led to unique venoms in all five centipede orders that share no single toxin family, which makes it impossible to speak of a centipede venom. The venoms of giant centipedes (Scolopendromorpha) represent a climax with several new neurotoxic peptides. The processes that have led to the development and evolution of venom proteins in centipedes are illustrated here. First data on genomic level suggest that even horizontal gene transfer might play an important role.*

### Schlagworte:

Hundertfüßer, Chilopoda, aktiv giftig, passiv giftig, moderne Venomik, Tiergifte, Giftevolution.

## Danksagung:

Wir möchten vor allem Ronald Jenner und Eivind Undheim für die unglaublich spannende und enthusiastische Kooperation in ihrem Hauptforschungsbereich, der Giftevolution in Hundertfüßern, danken. Auch die 1KITE Myriapoden Task Force mit dem Fokus auf der Evolution der Myriapoden muss hier erwähnt werden – was lange währt, wird oft besser.

## Literatur

- [1] B. M. von Reumont et al. (2014). Quo vadis venomics? A roadmap to neglected venomous invertebrates, *Toxins* 6, 3488–3551.
- [2] G. Zancolli, N. R. Casewell (2020). Venom Systems as Models for Studying the Origin and Regulation of Evolutionary Novelty, *Molecular Biology and Evolution* 37, 2777–2790.
- [3] T. Lüddecke, B. M. von Reumont (2020). Tiergifte als Quelle neuartiger Bioressourcen. *BIOspektrum* 26, 724–727.
- [4] A. A. Walker et al. (2020). Deadly Proteomes: A Practical Guide to Proteotranscriptomics of Animal Venoms, *PROTEOMICS* 20, 1900324, 1–21.
- [5] R. A. Jenner et al. (2019). Parallel Evolution of Complex Centipede Venoms Revealed by Comparative Proteotranscriptomic Analyses, *Molecular Biology and Evolution* 36, 2748–2763.
- [6] R. Fernandez et al. (2016). Exploring Phylogenetic Relationships within Myriapoda and the Effects of Matrix Composition and Occupancy on Phylogenomic Reconstruction, *Systematic Biology* 65, 871–889.
- [7] G. Giribet, G. D. Edgecombe (2019). The Phylogeny and Evolutionary History of Arthropods, *Current Biology* 29, 592–602.
- [8] N. U. Szucsich et al. (2020). Four myriapod relatives – but who are sisters? No end to debates on relationships among the four major myriapod subgroups, *BMC Evolutionary Biology* 20, 144, 1–15.
- [9] J. T. Haug et al. (2014). The evolution of centipede venom claws – open questions and possible answer, *Arthropod, Structure & Development* 43, 5–16.
- [10] M. Kenning et al. (2017). The ultimate legs of Chilopoda (Myriapoda): a review on their morphological disparity and functional variability, *PeerJ* 5: e4023, 1–36.
- [11] S. H. Drukewitz, B. M. von Reumont (2019). The Significance of Comparative Genomics in Modern Evolutionary Venomics. *Frontiers in Ecology and Evolution* 164, 1–14.
- [12] E. A. B. Undheim et al. (2015). Production and packaging of a biological arsenal: evolution of centipede venoms under morphological constraint, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 112, 4026–4031.
- [13] V. Schendel et al. (2019). The Diversity of Venom: The Importance of Behavior and Venom System Morphology in Understanding Its Ecology and Evolution, *Toxins* 11, 666, 1–22.
- [14] E. A. B. Undheim et al. (2014). Multifunctional warheads: diversification of the toxin arsenal of centipedes via novel multidomain transcripts, *Nature Review. Genetics* 102, 1–10.
- [15] E. A. B. Undheim et al. (2021). Phylogenetic analyses suggest centipede venom arsenals were repeatedly stocked by horizontal gene transfer, *Nature Communications* 12, 818, 1–14.

## Verfasst von:



Björn M. von Reumont wurde 1977 in Bad Honnef geboren. Von 1999–2005 studierte er Biologie (Dipl.) an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn und promovierte dort 2010 im Bereich Zoologie. Danach folgten Positionen als Postdoktorand am Zoologischen Forschungsmuseum König (Bonn) und am Natural History Museum (London). Seine Zeit als Assistent an der Universität Leipzig (von 2015–2018) schloss er 2020 mit der Habilitation ab im Bereich Zoologie zum Thema Giftevolution in vernachlässigten Invertebraten. Von 2018 bis 2021 Koordinator der Gruppe Tiergifte am Institut für Insektenbiotechnologie an der Justus Liebig Universität in Gießen über das LOEWE-Zentrum für Translationale Biodiversitätsgenomik bei Senckenberg in Frankfurt am Main. An der Evolution von Giften forscht er seit 2012.



Nikolaus Szucsich wurde 1969 in Eisenstadt (Österreich) geboren. Er studierte von 1990–1998 Zoologie an der Universität Wien, wo er 2007 auch promovierte. Nach einer PostDoc-Phase in Rostock und einer Vertretungsprofessur an der Universität in Hamburg ist er seit 2014 Koordinator der Österreichischen Biodiversitätsinitiative ABOL (The Austrian Barcode of Life). Zurzeit versucht er in einer Kooperation mit dem LOEWE-Zentrum für Translationale Biodiversitätsgenomik die ersten Genome für Paupoden und Symphylen zu sequenzieren.



Andy Sombke wurde 1977 in Grevesmühlen geboren. Von 1997–2003 studiert er an der Universität Rostock Biologie und begann die Promotion am Max-Planck-Institut für chemische Ökologie in Jena über die vergleichende Neuroanatomie und Sinnesbiologie der Hundertfüßer, die er 2011 an der Universität Greifswald abschloss. Als Assistent habilitierte er sich dort 2017 im Fach Zoologie zur Morphologie und Evolution der Arthropoden. Seit 2018 ist er Assistent im Department für Evolutionsbiologie an der Universität Wien und forscht primär zur Morphologie und Evolution der Myriapoden.

## Korrespondenz

Dr. rer. nat. habil. Björn M von Reumont  
Alten-Busecker-Str. 41  
35396 Gießen  
webpage: [www.venom-evolution.de](http://www.venom-evolution.de)  
E-Mail: [bmv@reumont.net](mailto:bmv@reumont.net)

## Vom antarktischen Schelf bis in die Tiefsee

# Große Artenvielfalt im Südpolarmeer

GRITTA VEIT-KÖHLER | DORTE JANUSSEN | ANGELIKA BRANDT



**Mit dem Forschungseisbrecher POLARSTERN wird auch die Antarktische Tiefsee erkundet.** Foto: Gritta Veit-Köhler.

*Pinguine, Wale und Robben kommen uns als erste in den Sinn, wenn wir an die Tierwelt der Antarktis denken. Vielleicht kennen wir auch Aufnahmen von den vielfältigen Lebensgemeinschaften auf dem antarktischen Schelf. Aber wie sieht es in der Tiefsee aus? Auch dort geht es in der Antarktis spektakulär zu: Neben den typischen Schwämmen sind es gerade die kleineren und die winzigen Tiere, die erstaunlich hohe Artenzahlen hervorbringen. Dieser Artikel handelt von der Artenvielfalt am Meeresboden der Antarktis.*

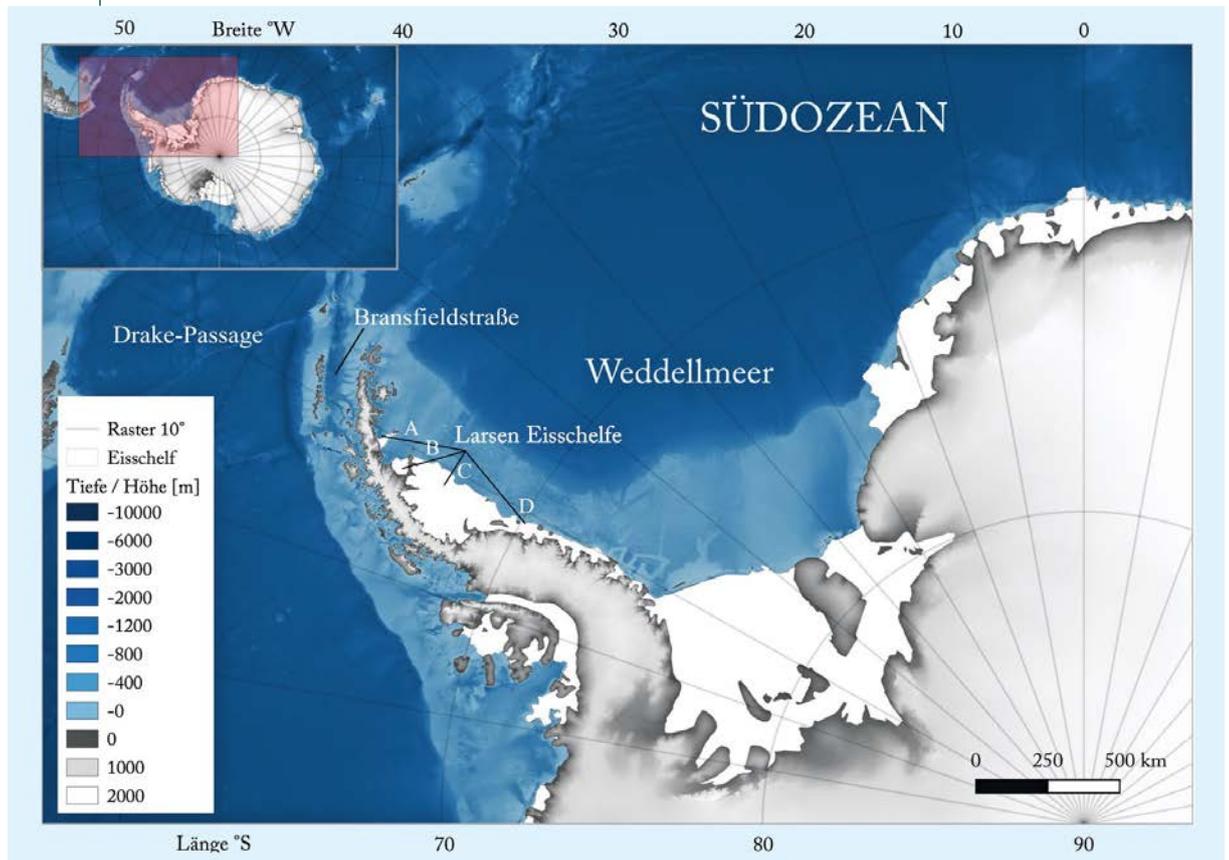
Unser blauer Planet ist zu fast drei Viertel von Meeren und Ozeanen bedeckt. Davon gehören 88 Prozent zur Tiefsee, die nach einer gängigen Definition unterhalb von 200 Metern beginnt. Vom Schelf geht es über die Kontinentalhänge in die Tiefe. Dort liegen zwi-

schen 4.000 und 6.000 Metern unter dem Meeresspiegel die größten Ökosysteme unserer Erde: die abysalen Ebenen. Auch die Antarktis ist von solchen Tiefseeebenen umgeben, die den größten Teil des Südpolarmeeres ausmachen (Abbildung 1). Aber weil der Kontinent durch die Masse seines gewaltigen Eispanzers tief in den Erdmantel gedrückt wird, liegen seine Kontinentalshelpe mit bis zu 800 Metern deutlich tiefer als die der anderen Kontinente (Abbildung 2).

Im Südozean sind jahreszeitliche Veränderungen und Wassertemperatur nicht miteinander gekoppelt. Das Meerwasser ist „isothermal“; es hat also das ganze Jahr über mehr oder weniger gleichförmige Temperaturen, die um 0 °C liegen. Zusätzlich ist die Nahrungsverfügbarkeit am Meeresboden in weiten Gebieten eher gering. Die lange dunkle Winterzeit und die Eisbedeckung sind dafür verantwortlich, dass vielerorts wenig oder nur zeitlich begrenzt Primärproduktion durch das Phytoplankton stattfindet. Dazu kommt trotz der hohen Nährstoffkonzentration im Südozean ein Mangel an Eisen, der das Wachstum des Phytoplanktons bremst [1]. Betrachten wir also die Primärproduktion und die Bathymetrie, dann beginnt in der Antarktis die Tiefsee in weiten Gebieten schon auf dem Schelf. Wir werden sehen, ob das in der Tierwelt auch so ist.

*Dieser Beitrag gehört zu unserer Serie über Forschungsprojekte aus dem DFG-Schwerpunktprogramm 1158 „Antarktisforschung“.*

ABB. 1 | WEDDELLMEER UND ANTARKTISCHE HALBINSEL



Die Antarktis ist vom Südozean umschlossen. Die kontinentalen Eismassen gehen fließend in Eisschelfe über, die sich weit hinaus auf die Randmeere erstrecken, wie hier im Weddellmeer (weiß dargestellt). Die Karte wurde mit dem Programm QGIS und Daten von GEBCO und [www.natureearthdata.com](http://www.natureearthdata.com) erstellt. Karte: Leon Hoffman.

### Beprobungen, bestimmen, beschreiben – Vielfalt auf dem Meeresboden

Ranzenkrebse, Glasschwämme, Ruderfußkrebse und Borsenwürmer sind nur einige der wirbellosen Tiergruppen des Südpolarmeeres, die das Herz von Taxonom/-innen höher schlagen lassen. In der Taxonomie bestimmen und

beschreiben wir Arten und ordnen sie in das zoologische System ein. Mit morphologischen, molekularen und biogeografischen Methoden erforschen wir, wie einzelne Gruppen oder Arten miteinander verwandt sind und aus welchen Vorfahren sie entstanden sein können. Taxonom/-innen arbeiten an Forschungsmuseen und Universitäten und haben zum Beispiel als Kurator/-innen die wichtige Aufgabe, die wertvollen naturhistorischen Sammlungen zu betreuen und an ihnen zu forschen. Gemeinsam mit Technischen Assistent/-innen und Studierenden werden Proben bearbeitet, faunistische Analysen erstellt und statistische Auswertungen gemacht. Jegliche Art von Biodiversitätsforschung und die meisten ökologischen Untersuchungen basieren auf der korrekten Bestimmung von Arten. Das ist nur möglich, wenn Taxonom/-innen neue Arten wissenschaftlich beschreiben, sie den Sammlungen zuführen und genetische Referenzbibliotheken ergänzen (Abbildung 3). Natürliche Veränderungen von Artengemeinschaften und Langzeitfolgen anthropogener Einflüsse können nur abgeschätzt werden, wenn die untersuchten Organismen wissenschaftlich korrekt bestimmt werden.

Die Diversität der Tiefseetiere des Weddellmeeres zu erforschen war das Ziel einer Serie von Expeditionen: Drei ANDEEP-(ANTarctic benthic DEEP-sea biodiversity – colonization history and recent community patterns) und zwei

#### IN KÜRZE

- Die **Biodiversität der antarktischen Tiefsee** ist sehr hoch und aus diesem Grund noch relativ wenig untersucht.
- Taxonom/-innen erforschen die Artenvielfalt und **beschreiben unbekannte Arten**.
- Für jede Tiergruppe, die im, auf oder kurz über dem Sediment lebt, gibt es an Bord von Forschungsschiffen **unterschiedliche Probenahmegeräte**.
- **Meio-, Makro- und Megafauna sind Größenklassen**, in denen verschiedene Tiergruppen zusammengefasst werden.
- In der Antarktis kommen typische Tiefseearten auch **auf dem Schelf vor und umgekehrt**.
- Unter dem Schelfeis herrschen ähnliche Umweltbedingungen wie in der Tiefsee, deshalb kommen dort **etliche Tiefseearten** vor.

Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite 56 erklärt.

ANDEEP-SYSTCO-(SYSTEM COUpling)-Expeditionen mit dem Forschungsschiff FS POLARSTERN fanden seit dem Jahr 2002 statt, und immer noch ist das gesammelte Probenmaterial gut für Überraschungen. Über das Leben in der südpolaren Tiefsee war vor dieser Expeditionsreihe nicht sehr viel bekannt. Jetzt aber hatten mehr als 80 Wissenschaftler/-innen aus 13 Nationen die Chance, die außerordentlich hohe Vielfalt und diverse Zoogeographie der Meeresbodenbewohner im Weddellmeer und in angrenzenden Meeresgebieten zu dokumentieren. Obwohl an fast 60 Stationen und über 6.000 Meter tief beprobt wurde, haben wir lediglich einen Bruchteil des Gesamtbildes gesehen, denn von den ca. 28 Millionen km<sup>2</sup> Tiefseeboden des Südpolarmeeres haben wir nur 0,2 km<sup>2</sup> untersuchen können. Hier berichten wir über die wichtigsten Ergebnisse der ANDEEP-Expeditionsreihe.

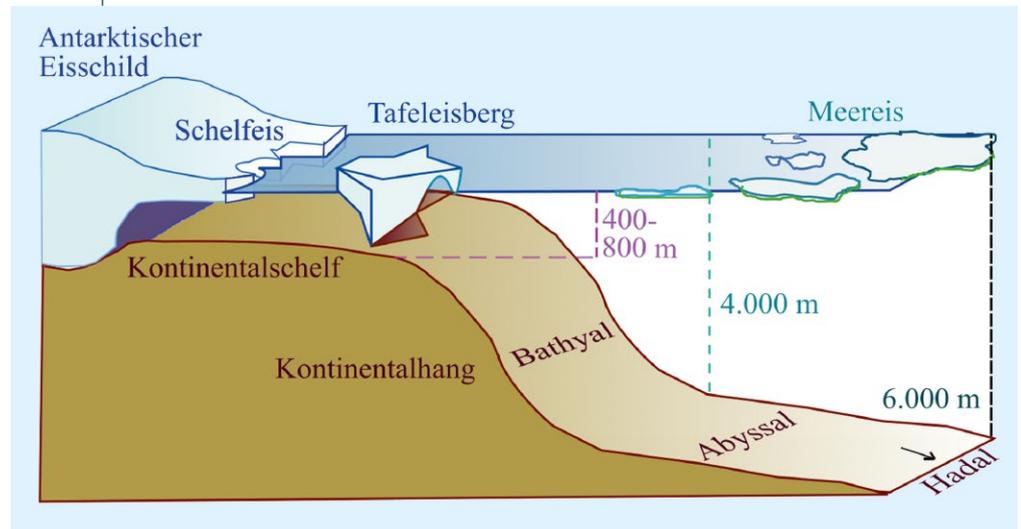
Neben der unerwartet hohen Vielfalt aller Tiergruppen (alleine in der Makrofauna 1.400 Arten, 700 davon der Wissenschaft bislang noch unbekannt) kamen 52 Prozent der gefundenen Arten nur sehr selten vor. Was kann zu derart hohen Artenzahlen geführt haben? Zuerst einmal die geologische Isolation der Antarktis, die vor etwa 30–40 Millionen Jahren begann. Der antarktische Zirkumpolarstrom trennt seit der Öffnung der Drake-Passage und der endgültigen Abtrennung Tasmaniens den Südozean von den anderen Ozeanen [2]. Der Kontinent und auch die antarktischen Gewässer (diese vor 14 Millionen Jahren) kühlten ab, und neue Arten mit entsprechenden Anpassungen an tiefe Temperaturen konnten entstehen. Veränderte Umweltbedingungen, Isolation und unbesetzte ökologische Nischen sind die Voraussetzungen für die

schnelle Bildung neuer Arten, die sogenannte ► adaptive Radiation. Sie findet auch heute noch in der Antarktis besonders in den Tiergruppen statt, die in nicht-besetzte Nischen vorstoßen konnten, weil durch die erdgeschichtlichen Veränderungen ganze systematische Gruppen nicht vorhanden waren wie z. B. viele Fische und alle höheren Krebse. Die ozeanografische Trennung von anderen Meeresgebieten führt auch zu einer großen Zahl von Endemiten: Arten, die nur in der Antarktis und nirgends sonst auf der Welt vorkommen.

### Von ganz groß bis mikroskopisch klein – Größenklassen sind nicht nur praktisch

Warum definieren wir Größenklassen? Das hat zum einen praktische Gründe. Weil man schon rein technisch in einer einzigen Probe meist nicht metergroße Schwämme und

ABB. 2 | VOM ANTARKTISCHEN SCHELF IN DIE TIEFSEE



Der Kontinentalschelf liegt in der Antarktis tiefer als bei den anderen Kontinenten. Unter den Schelfeisgebieten herrschen ähnliche Bedingungen wie in der Tiefsee der Kontinentalhänge oder der abyssalen Ebenen. Grafik (erstellt mit Inkscape 1.1): Gritta Veit-Köhler.

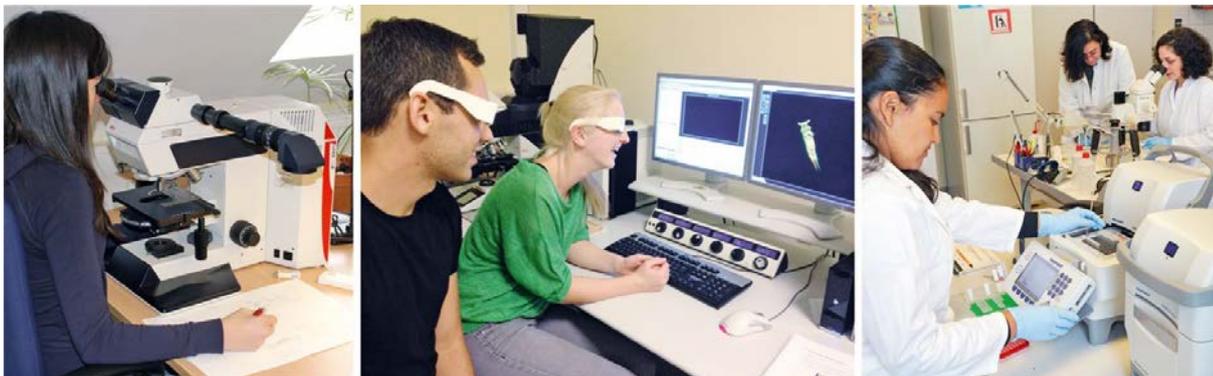


ABB. 3 Für viele Tiergruppen werden neue Arten auch heute noch am besten zeichnerisch dargestellt (links). Mit dem konfokalen Laser-Scanning-Mikroskop (CLSM) können 3-D-Darstellungen erzeugt werden (Mitte). Im Idealfall ergänzen sich traditionelle Techniken und moderne molekulargenetische Untersuchungen (rechts). Fotos: Gritta Veit-Köhler.



**ABB. 4** Probenahmegeräte im Einsatz auf der POLARSTERN. a) Großkastengreifer und b) Agassiz-Trawl. c) Epibenthoschlitten und d) Multicorer. Fotos: Gritta Veit-Köhler (a, d), Nils Brenke (b), Angelika Brandt (c).

ben ausgesiebt. Die verschiedenen Maschenweiten der Siebe bestimmen die Größenklassen der Tiere. An Bord von Forschungsschiffen wie der POLARSTERN werden außerdem verschiedene Probenahmegeräte eingesetzt, um Tiefseeorganismen zu sammeln (Abbildung 4). Für jede Lebensgemeinschaft ist ein anderes Gerät optimal. Das Agassiz-Trawl ist ein Metallschlitten mit einem doppelwandigen grobmaschigen Schleppnetz mit 10 Millimetern Maschenweite im äußeren Netz, das die Oberfläche des Meeresbodens absammelt. Es eignet sich besonders gut für **Megafauna** (siehe Tabelle 1). Das sind wirbellose Tiere, die größer als 10 Millimeter und auf Unterwasserfotos gut erkennbar sind. Dazu gehören viele Schwämme und Stachelhäuter wie Seeigel, Seegurken, Seesterne oder die im Abyssal sehr häufigen Schlangensterne. Das Trawl eignet sich aber auch für Fische und größere Tiere, die in den oberen Sedimentschichten oder auf eingesammelten Steinen leben. Wie auch das Trawl wird der Epibenthoschlitten bei einem Knoten Fahrt geschleppt und sammelt mit zwei verschließbaren Netzen von 0,5 Millimetern und zwei seitlichen Netzbechern von 0,3 Millimetern Maschenweite auf und über („epi“) dem Meeresboden lebende und schwimmende wirbellose Tiere. Makrofauna und sogar größere Meiofauna (s. u.) werden mit dem Epibenthoschlitten beprobt. Dieser kann zudem mit einer Tiefseekamera ausgestattet werden, um einen Eindruck von der Verteilung der Lebewesen auf dem Meeresboden zu erhalten. Der Großkastengreifer ist ein weiteres schweres Gerät, mit dem **Makrofauna** (je nach Definition wirbellose Tiere mit einer Größe zwischen 0,25 und 10 Millimetern) oder manchmal sogar Megafauna beprobt wird. So finden wir auch Seesterne oder Seeigel im Kastengreifer. Das Gerät stanz einen Teil des Meeresbodens mit einer Fläche von 50×50 Zentimetern aus und bringt vor allem Endofauna (im Sediment lebende Tiere wie Krebse, Muscheln und Borstenwürmer) an die Oberfläche. Zum Sammeln von **Meiofauna** (je nach Definition Tiere zwischen 0,32 und maximal 1 Millimeter) wird an Bord gerne der Multicorer eingesetzt. Er ist ideal geeignet, um un-

mikroskopisch kleine Ruderfußkrebse zusammen sammeln und quantitativ bearbeiten kann, werden seit jeher unterschiedlich dichte Netze benutzt oder Sedimentpro-

**TAB 1. FAUNA IM BENTHOS DES SÜDOZEANS**

Größenklasse	Größe	Lebensweise	Häufige Vertreter
<b>Meiofauna</b> (griechisch „meios“: kleiner)	aktuell meist 0,32–0,5 mm (in Meiofauna-Studien bevorzugt: 0,32–1 mm)	interstitiell (zwischen den Sandkörnern), im Schlick wühlend, in der organischen Schicht auf dem Sediment kriechend, kurzzeitig in der Wassersäule schwimmend (v. a. Ruderfußkrebse)	Fadenwürmer (Nematoda), Ruderfußkrebse (Copepoda), Muschelkrebse (Ostracoda), Hakenrüßler (Kinorhyncha), Bärtierchen (Tardigrada), Bauchhärlinge (Gastrotricha)
<b>Makrofauna</b> (griechisch „makros“: groß)	0,5–10 mm (Untergrenze je nach Studie auch ab 0,25 mm oder erst ab 1 mm)	sessil (festsitzend) oder vagil (frei beweglich) im (Endofauna) oder auf dem Sediment (Epifauna); wühlend, grabend, laufend, kriechend oder bodennah schwimmend	Krebse (Crustacea: Asseln, Flohkrebse, Scherenasseln), Ringelwürmer (Annelida: Viel- und Wenigborster), Weichtiere (Mollusca: Muscheln, Schnecken)
<b>Megafauna</b> (griechisch „mégas“: groß)	>10 mm	sessil oder vagil als Endo- oder Epifauna, bodennah schwimmend	Schwämme (Porifera), Stachelhäuter (Echinodermata: Seeigel, Seegurken, Seesterne, Schlangensterne), Weichtiere (Mollusca), Fische (Pisces)

gestörte Sedimentkerne mit dem darüber befindlichen bodennahen Wasser zu erhalten. Wenn das Gerät auf dem Meeresboden gelandet ist, werden Plexiglasrohre langsam in das Sediment gedrückt und beim Hieven verschlossen. So überstehen die obersten Sedimentschichten, in denen die Meiofauna zwischen Sandkörnern oder im Schlamm lebt, ungestört den Weg aus der Tiefe nach oben.

Größenklassen haben aber auch einen ökologischen Sinn, zumindest in den gemäßigten Breiten. Die Arten der Meiofauna produzieren nur wenige Larven, die gut ausgestattet aus dem Ei schlüpfen. Die Besonderheit ist, dass Meiofauna zeitlebens ans Sediment gebunden, also ► benthonisch ist. Im Gegensatz dazu produzieren die meisten Arten der Makro- und Megafauna große Mengen von planktonischen Larven. Die Larven sind meist mit weniger Dottervorrat ausgestattet und fressen direkt im freien Wasser, wo sie mit den Strömungen verbreitet werden. Nur in der Antarktis ist auch das anders: Viele der zur Makro- und Megafauna gezählten Arten haben nur wenige Nachkommen und betreiben oft Brutpflege (z. B. Ranzenkrebse, viele Schwämme, Meeresborstenwürmer oder Seeigel), die auch mit einer direkten Entwicklung gekoppelt sein kann, bei der die Jungtiere als kleine Erwachsene schlüpfen (z. B. bei Ranzenkrebsen und einigen Seeigeln). Im Vergleich zu den gemäßigten Zonen gibt es in der Antarktis deutlich weniger Tierarten mit planktonischen Larvenstadien. Das liegt auch an den in weiten Teilen des Südozeans unregelmäßig und oft nur lokal begrenzt stattfindenden Phytoplanktonblüten (wie z. B. in ► *Polynyas* oder bei abschmelzendem Meereis [3, 4]). Diese Unregelmäßigkeit wäre für eine Nachkommenschaft, die jahreszeitabhängig und massenhaft auftritt und auf schnellen Zugang zu frei verfügbarer Nahrung angewiesen ist, ziemlich unvorteilhaft.

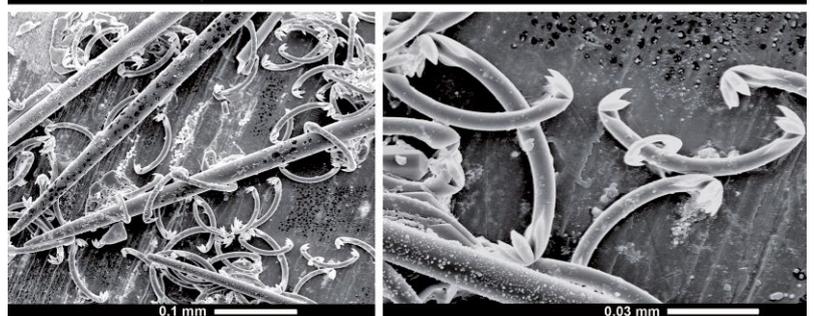
### Megafauna – das Beispiel Schwämme

Am Meeresboden der Antarktis beeindruckt in der Megafauna sicherlich zuallererst die Schwämme (Porifera). Schwämme können beachtliche Größen (oft über 1 m Höhe) erreichen. Es gibt Hinweise, dass die großen antarktischen Glasschwämme zwar sehr langsam wachsen, aber immer wieder auch Wachstumsschübe und längere Wachstumspausen einlegen. Sie können mehrere hundert Jahre alt werden [5]. Mit 76 Arten aus 30 Familien sind alle Klassen der Schwämme im Südpolarmeer vertreten: Kalk-, Hornkiesel- und Glasschwämme (Calcarea, Demospongiae, Hexactinellida). Die Artenvielfalt nimmt mit größerer Wassertiefe am deutlichsten bei den Glasschwämmen zu. Obwohl sie weltweit zur typischen Tiefseefauna gehören und auch in mehr als 1.000 Meter Tiefe noch beachtliche Körpergrößen erreichen können, sind die beiden einzigen Gattungen *Rossella* und *Anoxycalyx* vor allem für den antarktischen Schelf charakteristisch (Abbildung 5).

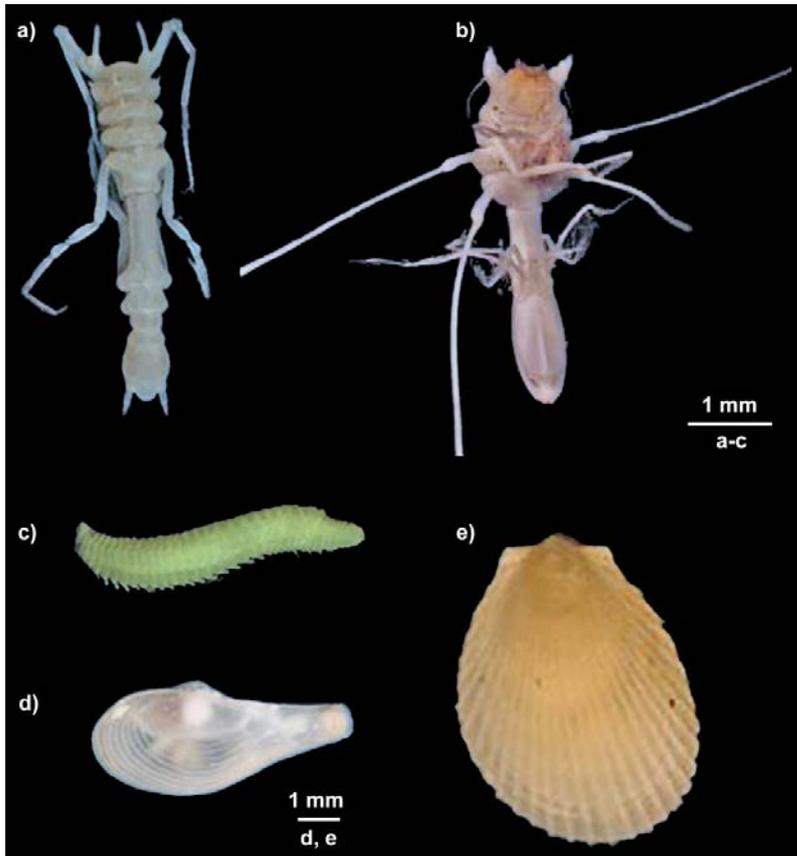
Bislang sind aus dem Expeditionsmaterial 36 neue Schwammarten beschrieben und 58 neue zoogeographische



**ABB. 5** Glasschwämme der Familie Rossellidae auf dem Schelf des Weddellmeeres: *Rossella* cf. *racovitzae* (stachelig) und *R.* cf. *nuda* (hellbraun) sowie vermutlich *Anoxycalyx* (*Scolymastra*) *joubini* (glatt, weiß). Die Schwämme dienen als „Substrat“ u. a. für Schlangensterne und andere Stachelhäuter (Schwebcrinoide). Aufgenommen mit einem Tauchroboter (ROV). Foto: Tomas Lundälv.



**ABB. 6** Klein und räuberisch: Der Schwamm *Lycopodina* cf. *callithrix* (Hentschel, 1914) sowie rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der häkchenförmigen Nadeln eines anderen Raubschwamms der Gattung *Chondrocladia* (beide gehören zur Familie der Cladorhizidae). Foto und REM-Aufnahmen: Dorte Janussen.



**ABB. 7** Sie gehören zum Inventar der Makrofauna in der Tiefsee des Weddellmeeres. Asseln der Gattungen *Ischnomesus* (a) und *Munnopsis* (b), ein Vielborster der Gattung *Ophryotrocha* (c) und die Muscheln *Cuspidaria* (d) und *Limatula* (e). Fotos: Wiebke Brökeland (a), Michael Raupach (b), Brigitte Ebbe (c), Katrin Linse (d, e).

Nachweise erbracht worden. Während die meisten Exemplare zu den Glasschwämmen oder den Hornkieselchwämmen (z. B. [6]) gehören, war die Entdeckung von Kalkschwämmen in der südpolaren Tiefsee eine kleine Sensation [7]. Bis dahin glaubte man, dass Kalkschwämme typische Flachwasserbewohner sind, da man davon ausging, dass die fragilen Kalknadeln dem hohen Kohlendioxidpartialdruck in der Tiefe nicht standhalten. Unterhalb von 850 Metern waren Kalkschwämme aus dem Südpolarmeer nicht bekannt. Aber auch hier sind Ausnahmen wohl die Regel: Durch die systematische Beprobung konnten sechs Kalkschwammarten zwischen 1.120 und 4.400 Metern Tiefe nachgewiesen werden. Vier davon waren der Wissenschaft bis dahin unbekannt.

Eine weitere Überraschung war die weite Verbreitung von sehr kleinen räuberischen Schwämmen aus der Familie der Cladorhizidae (Demospongiae). Sie sind in abysmalen und ▶ hadalen Tiefen bis 9.000 Meter die häufigsten Schwämme und gehören somit der echten Tiefseefauna an. Acht neue Arten dieser Tiere, die nur wenige Millimeter klein sind, wurden in der südpolaren Tiefsee entdeckt [8, 9]. In ihren häkchenförmigen Schwammnadeln (Spicula) verfangen sich beispielsweise Ruderfußkrebse, die

nicht viel kleiner sind als sie selbst (Abbildung 6). Dadurch haben sie im nahrungsarmen Bodenwasser in der Tiefsee einen Vorteil.

Eine zunehmend bedeutende Rolle spielen antarktische Schwämme wegen ihrer Inhaltsstoffe, die in der medizinischen Industrie genutzt werden können. Bestimmte Arten der Hornkieselchwämme enthalten die meisten symbiontischen Mikroorganismen. Aus Arten der Tiefwassergattung *Latrunculia* (leicht erkennbar an der leuchtend grünen Farbe, die vom Schwamm selbst produziert wird) wurden wichtige Naturstoffe gewonnen, die im Labor effektiv die Vermehrung von Krebszellen verlangsamen [10].

### Makrofauna – dominiert von Asseln, Borstenwürmern, Weichtieren

Meeresborstenwürmer (Polychaeta), Weichtiere (Mollusca) und Krebse (Crustacea) sind in der Tiefsee des Südpolarmees die häufigsten und artenreichsten Tiergruppen (Abbildung 7). Die meisten Arten der benthonischen Krebse der Antarktis gehören zu den Ranzenkrebse (Peracarida). Der Begriff „Ranzen“ bezieht sich auf den Brutbeutel, den sie an ihrer Bauchseite tragen. Die Nachkommen werden darin herumgetragen, bis sie weit genug entwickelt und kräftig genug sind, sich selbstständig zu ernähren und zu überleben. Meeresasseln (Isopoda) sind nach den Flohkrebse (Amphipoda) die zweithäufigste Gruppe der Peracarida. An 40 Tiefseestationen wurden mehr als 13.000 Individuen gefunden, die zu 674 Arten gehören. Das ist im Vergleich zu den 371 vom antarktischen Schelf bekannten Arten sehr viel, vor allem wenn wir die wenigen Tiefseestationen den vielen bisher untersuchten Schelfstationen gegenüberstellen. Viele Asselarten gehören zu Komplexen, die sich aus morphologisch sehr ähnlichen Arten zusammensetzen. Diese sogenannten kryptischen Arten können nur mit molekulargenetischen Untersuchungen aufgespürt werden [11]. Die tatsächlichen Artenzahlen in der Tiefsee liegen also noch höher. Sehr viele Asseln haben – vermutlich aufgrund ihrer Brutpflege – nur kleine Verbreitungsgebiete. Die Brutpflege kann auch ein Grund dafür sein, dass 86 Prozent der Meeresasseln entweder nur aus dem Südpolarmeer bekannt oder bisher unbeschrieben sind. Dazu zählen auch zwei neue Familien und 43 neue Gattungen. Expeditionen in die Antarktis sind auch heute noch immer Entdeckungsfahrten.

Auch zu den Tiefsee-Polychaeta der Antarktis gab es nur sehr wenige Informationen. Inzwischen wissen wir: Das Artenspektrum der Meeresborstenwürmer in der südpolaren Tiefsee unterscheidet sich von dem der umgebenden Ozeangebiete [12]. Allerdings sind die Tiefseearten innerhalb des Südozeans weit verbreitet, was im Gegensatz zu den kleinräumigen zoogeographischen Mustern der Meeresasseln steht. Langlebigkeit und die Fortpflanzung über planktonische Larvenstadien können Gründe für die weiten Verbreitungsgebiete der Polychaeta sein.

Bei den Weichtieren zeigt sich ein anderes Bild. Mit insgesamt etwa 260 Arten [13] sind die Mollusca weitaus seltener in der Tiefsee vertreten als auf dem kontinentalen Schelf, auf dem bislang rund 800 Arten gefunden wurden [14]. Der Rückgang der Arten mit der Tiefe ist bei Schnecken (Gastropoda) deutlicher als bei Muscheln (Bivalvia). Aber überall sind 75 Prozent der Arten endemisch. Das ist ein sehr hoher Prozentsatz an Arten, die nur in einer begrenzten Region vorkommen. Im Atlantik weit verbreitete Arten fehlen in der antarktischen Tiefsee, und etwa 40 Prozent der Arten wurden nur in abyssalen Tiefen von rund 4.000 Metern gefunden. Eine interessante Entdeckung war, dass der sehr seltene Antarktische Einschaler *Laevipilina antarctica* Warén & Hain, 1992, ein „Lebendes Fossil“ aus der Klasse der Monoplacophora (Urmützenschnecken), auch bis in 3.000 Meter Wassertiefe vorkommt. Diese Tiere sind zuvor nie tiefer als 650 Meter gefunden worden [15].

### Meiofauna – „kleiner“ als Makrofauna

Zur Meiofauna (Abbildung 8) gehören Fadenwürmer (Nematoda) und Ruderfußkrebse (Copepoda), gefolgt von Hakenrüsslern (Kinorhyncha), Bärtierchen (Tardigrada), Rädertieren (Rotifera), Muschelkrebse (Ostracoda) und den schon aufgrund ihrer Namen interessanten Bauchhärlingen (Gastrotricha) oder Korsettträgertierchen (Loricifera). Die Meiofauna setzt sich also aus einem ganz anderen Spektrum von Gruppen zusammen als die Makrofauna. Neben vielzelligen Vertretern sind in der Meiofauna auch große einzellige Organismen zu finden wie Kammerlinge (Foraminifera) oder Wimpertierchen (Ciliophora).

Wohin man auch schaut, in der Meiofauna sind die meisten der antarktischen Arten neu für die Wissenschaft. Ruderfußkrebse sind besonders vielfältig, und bislang ist nicht geklärt, warum einige Arten scheinbar ausschließlich in der Antarktis vorkommen und andere fast weltweite Verbreitungsgebiete haben [16, 17]. Es ist aber immer wieder schön, beim langwierigen Sortieren der Proben unter dem Stereomikroskop „alte Bekannte“ zu entdecken: Arten, die wir selbst beschrieben haben und die nun an ganz anderer Stelle in der Tiefsee oder im Flachwasser der Antarktis wieder auftauchen. Durch ihre Lebensweise ist die Meiofauna zwar an den Meeresboden gebunden, aber auch in anderem „Substrat“ ist sie zu finden. Und da schließt sich der Kreis: Meiofauna besiedelt Lebewesen, die Hohlräume zum Wohnen bieten. So sind Schwämme mit ihren Poren und Kanälen auch ein geeigneter Lebensraum für viele der kleinen Arten [18].

### Schwimmen, laufen, lange leben – Verbreitungsstrategien in der Tiefsee

Im Weddellmeer entsteht kaltes Tiefenwasser, das absinkt und sich nach Norden ausbreitet. Dadurch trägt es zum Antrieb des globalen Strömungssystems bei. Durch diese Zirkulation kann Nahrung schnell in die Tiefsee transportiert werden. Aber auch Tiere können mit den Strö-

mungen verdriftet werden, als Larven oder auch noch als Adulte, denn viele Arten sind sehr klein. An ihrer Morphologie ist es erkennbar, aber auch auf Tiefseevideos ist es zu sehen: 209 verschiedene Arten von Isopoden aus der Antarktis können schwimmen oder sich zumindest vom Sediment erheben [19], was schon ausreicht, um mit den Strömungen zu reisen. Viele Vertreter der Meiofauna – vor allem die Ruderfußkrebse – sind zwar gute Schwimmer, entfernen sich aber nie allzu weit vom Meeresboden, der ihnen Nahrung, Lebensraum und Schutz vor Fressfeinden bietet. Die größten Unterschiede in der Reproduktion sind sicherlich die Brutpflege nur weniger Nachkommen auf der einen und die Abgabe einer großen Zahl von Larven auf der anderen Seite. Die überlebenden Jungtiere beider Varianten tragen am Ende dazu bei, die Arten zu erhalten, aber nur die freien Larven können sehr weit mit der Wasserströmung fortstreifen. Daher haben diese Arten oft viel größere Verbreitungsgebiete als Arten, die Brutpflege betreiben.



**ABB. 8** Meiofauna aus der Antarktis (v.l.n.r.), oben: Ruderfußkrebs (Copepoda), Larve eines Borstenwurmes (Polychaeta), Mitte: Bauchhärling (Gastrotricha), Meeresmilbe (Halacarida), Hakenrüssler (Kinorhyncha), unten: zwei Fadenwürmer (Nematoda) aufgenommen mit dem konfokalen Laser-Scanning-Mikroskop (CLSM) und coloriert. Aufnahmen: Stephan Durst und Jan Schuckenbrock.



**ABB. 9** Drei Ruderfußkrebsearten aus der Tiefsee des Weddellmeeres. Entdeckt und neu beschrieben (v.l.n.r.): *Emertonia andeep*, *Wellsopsyllus antarcticus* und *Emertonia berndi*. Alle Tiere sind kleiner als ein halber Millimeter. Die CLSM-Bilder wurden nachträglich coloriert. Aufnahmen (v.l.n.r.): Gritta Veit-Köhler, Johanna Kottmann und Terue Kihara, Annabel Mathiske.

Aber auch ein langes Leben kann dazu beitragen, dass sich Arten verbreiten. Dann macht es auch nichts, wenn sie ans Sediment gebunden sind. Sie haben Zeit zum Laufen. Das wird besonders deutlich, wenn wir uns vor Augen halten, dass viele Arten der benthonischen Ruderfußkrebse sehr selten sind. Wie sollen sich Männchen und Weibchen einer Art in der Tiefsee treffen, wenn wir im Material einer ganzen Expedition nur zwei Exemplare einer Art finden? Es geht, und *Emertonia andeep* ist der Beweis (Abbildung 9, [20]). Nach ihrer Beschreibung haben wir die Art noch in vielen weiteren Tiefseebecken des Atlantiks gefunden, immer nur mit wenigen Individuen [16]. Der Trick: Weibliche Copepoden müssen nur einmal begattet werden und können dann ihr ganzes Leben lang befruchtete Eier produzieren.

### Einmal Tiefsee und zurück – Submergenz und Emergenz

In geologischen Zeiträumen und über lange evolutionsbiologische Zeitskalen gesehen sind die Faunen von Tiefsee und Flachwasser nicht wirklich voneinander zu trennen. Immer wieder kam und kommt es zu Artbildungen und Radiation in beiden Zonen und einem Abstieg in die Tiefe (Submergenz) oder einem Aufstieg aus der Tiefe (Emergenz) in flachere Regionen [21, 22]. Solche Ausbreitungen kommen besonders dann vor, wenn sich die ökologischen Umstände in den unterschiedlichen Tiefenzonen soweit ähneln, dass es den Arten leicht gemacht wird überall zu leben. In der Antarktis sind niedrige Temperaturen und – trotz aller Unwägbarkeiten – das relativ gute Nahrungsangebot Voraussetzungen, die Schelfarten ermöglichen auch die Tiefsee zu besiedeln.

Berühmt und einmalig sind die metergroßen Glasschwämme (Hexactinellida) der Familie Rosselliidae, die nach molekularen Ergebnissen seit der Eröffnung der Drake-Passage vor 30 Millionen Jahren den antarktischen Schelf und die bathyale Tiefsee bis etwa 1.500 Metern besiedeln [23]. Riesenwuchs, langsames Wachstum, ein hohes Alter, eine vermutlich späte Geschlechtsreife und die damit verbundene geringere Nachkommenzahl machen derartige „Wanderungen“ zur Besiedlung neuer Regionen zu Prozessen, die nicht schnell vonstattengehen.

Submergenz und Emergenz sind bei verschiedenen Familien der Meeresasseln dokumentiert. Die Schelfgemeinschaften der Isopoda erstrecken sich bis in eine Tiefe von 1.500 bis 2.000 Metern. Im Bathyal und Abyssal unterscheiden sich dann aber die Arten grundsätzlich von der Schelffauna

und gehören zu 97 Prozent zur Unterordnung Asellota, die auf dem Schelf recht selten ist. Bei den Polychaeta gibt es ebenfalls eurybathe Arten, das heißt sie sind über weite Tiefenbereiche zu finden. Auch bei ihnen verändert sich erst ab circa 2.000 bis 2.500 Metern Tiefe die Schelffauna sukzessive zu Kontinentalhanggemeinschaften, welche sich dann bis in das Abyssal fortsetzen. Aber die Artenvielfalt der Polychaeten nimmt mit zunehmender Tiefe ab und erreicht am Kontinentalhang bereits nur noch etwa die Hälfte des Artenreichtums auf dem Schelf. Auch die zur Meiofauna zählenden Fadenwürmer haben den Übergang von der Schelffauna zur Tiefseefauna erst unterhalb von 2.000 Metern Tiefe. Und im Weddellmeer gibt es kleine Kammerlinge (Foraminifera), die genetisch fast identisch sind mit Arten aus dem Rossmeer auf der anderen Seite des antarktischen Kontinentes und sogar mit Tieren aus der nordatlantischen Tiefsee. Es gibt morphologische und molekulargenetische Hinweise, dass bestimmte Foraminiferenarten eine sehr weite Tiefenverbreitung von 1.100 bis 6.300 Metern Wassertiefe haben können [9]. Somit wurden frühere Funde untermauert, die zeigten, dass Schelfarten in der Antarktis bis in größere Tiefen vorkommen können. Dies ist von anderen Kontinenten nicht bekannt [24].

### Wo alles anders ist: Das Schelf unter dem Schelfeis

Trotz aller Expeditionen ist die antarktische Tiefsee noch wenig erforscht und dies gilt noch mehr für die Gebiete, die zwar auf dem Schelf liegen, aber seit Jahrtausenden permanent vom Schelfeis bedeckt sind (Abbildung 10). In jüngerer Zeit führen die steigenden Temperaturen an der Antarktischen Halbinsel allerdings dazu, dass weite Teile

einiger der für die Antarktis typischen, sich auf das Meer erstreckenden Eisschelfe weggebrochen sind. Untersuchungen des nun erstmals zugänglichen 200 bis 400 Meter tiefen Meeresbodens in den Regionen Larsen A und B haben uns gezeigt, dass die Lebensgemeinschaften dort denjenigen der Tiefsee ähnlich waren [25]. Die Umweltbedingungen unter der oft mehrere hundert Meter dicken Eisaufgabe: dunkel, konstant kalt und nur sehr wenig Nahrung. Entsprechend besiedelten Tiefseearten den Larsen-Schelf, weil sie an solche Bedingungen besser angepasst sind als die übliche Schelffauna. Tiefseerauschwämme (*Asbestopluma*, *Chondrocladia*, *Abyssocladia*) und normalerweise abyssale Glasschwämme (*Caulophacus*) waren dort heimisch [26], und auch die Meiofaunagemeinschaften des Larsen-Schelfs ähnelten den Gemeinschaften aus dem 4.000 Meter tiefen Weddellmeer [27]. Und nicht nur die Gemeinschaften als solche waren sich ähnlich: Ruderfußkrebse der Art *Wellsopsyllus antarcticus* Kottmann & Veit-Köhler, 2013, die ursprünglich von 1.100 bis 4.500 Metern Tiefe im Weddellmeer gesammelt und beschrieben wurde (Abbildung 9, [28]), und die im Abyssal bis in den Atlantik weit verbreitete Art *Emertonia diva* Veit-Köhler, 2005, sind tatsächlich in rund 300 Metern Tiefe auf dem Schelf in der Larsen-Region wieder entdeckt worden (A. Rose, pers. Mitteilung). Eine Sensation, wenn man bedenkt, dass diese Arten sehr selten vorkommen und nur etwas über 0,3 Millimeter lang sind! Es ist sehr wahrscheinlich, dass unter den „permanenten“ Eisgebieten des Antarktischen Schelfs noch viele unbekannte Tiefseearten leben, die mit zunehmender Veränderung ihres Lebensraumes für immer verschwinden, bevor sie jemals erforscht werden können.

Aber seit dem Zerfall der Eisschelfe befinden sich diese Ökosysteme in rapidem Wandel und durchlaufen innerhalb nur weniger Jahre dramatische Veränderungen [25]. So waren 2011 die zuvor in der Larsen-Region dokumentierten Tiefseeschwämme nicht mehr auffindbar, dafür waren bereits 2007 mit dem Tauchroboter beobachtete Jungschwämme typischer Schelfgattungen (*Rossella* und *Anoxycalyx*) deutlich gewachsen, und viele weitere Exemplare hatten sich angesiedelt [29]. Auf den ersten Blick scheinen diese Schwämme vom Verschwinden des Schelfeises und der erhöhten Nahrungsverfügbarkeit zu profitieren. Vergleichen wir jedoch das kalte Weddellmeer mit den wärmeren Gebieten in der Bransfieldstraße und Drake-Passage, zeigt sich, dass diese charakteristischen Gattungen bei höheren Wassertemperaturen und geringerer Meereisbedeckung seltener vorkommen [30]. Das kann ein Hinweis darauf sein, was bei steigenden Meerestemperaturen auch im Weddellmeer passieren könnte.

Meeresforschung in der Antarktis ist und bleibt eine Herausforderung. Die Antarktis gibt ihre Geheimnisse nicht so einfach preis, und nach den ersten erfolgreichen Larsen-Expeditionen ist die Untersuchung des neuesten Abbruchgebietes Larsen C bislang noch keinem Menschen gelungen. Das Meereis ist inzwischen sogar für die POLAR-



**ABB. 10** Die antarktischen Eisschelfe erstrecken sich weit ins Meer hinein. Ihre Kante kann mehr als 30 Meter aus dem Wasser herausragen. Foto: Angelika Brandt.

STERN einfach zu dick. Aber echte Polarforscher/-innen geben nicht einfach auf. An Bord werden neue Pläne diskutiert und Ausweichstationen gesucht, an denen dann andere, ebenso dringliche Themen untersucht werden. So wurde anstelle von Larsen C in den Jahren 2013, 2018 und 2019 auf Expeditionen mit den Forschungsschiffen POLARSTERN und JAMES CLARKE ROSS das Verhältnis von Meereisbedeckung und Tiergemeinschaften am Meeresboden untersucht. Eins ist klar: Kleine und große Tiere in der Antarktis sind abhängig von der Nahrungsverfügbarkeit und diese wiederum hängt ganz eng mit der Dauer und Saisonalität der Meereisbedeckung zusammen [31–33]. Davon aber mehr im nächsten Artikel dieser Serie über das DFG-Schwerpunktprogramm Antarktisforschung.

### Zusammenfassung

Die abyssale Tiefsee der Antarktis wurde seit 2002 mit der Reihe der ANDEEP-Expeditionen untersucht. Die Fauna der Antarktischen Tiefsee ist sehr divers. Viele unbekannte Tierarten wurden entdeckt, Verbreitungsareale angepasst und systematische Zusammenhänge neu definiert. Tiefseearten kommen in der Antarktis auch auf dem Schelf vor, weil dieser tiefer liegt als der anderer Kontinente. Unter dem Schelfeis herrschen Bedingungen ähnlich wie in der Tiefsee, weshalb typische Tiefseegemeinschaften und -arten auch in diesen Regionen vorkommen.

### Summary

#### From the shelf to the deep sea: Biodiversity in the Southern Ocean

The abyssal deep sea of Antarctica has been studied with a series of ANDEEP expeditions since 2002. The fauna of the Antarctic deep sea is very diverse. Many unknown species

## GLOSSAR

**Adaptive Radiation:** Neue Arten entstehen durch genetische Variation und natürliche Auslese innerhalb von Populationen. Wenn diese Anpassungsmechanismen (Adaptationen) bei sich ändernden Umweltbedingungen, bei Isolation oder beim Wegfall von Konkurrenz zur Besetzung freier ökologischer Nischen (z. B. auf Inseln) führen, dann können sich aus gemeinsamen Vorfahren mehrere spezialisierte Arten durch Radiation („Ausstrahlung“) entwickeln. Die verschiedenen Arten der Darwin-Finken auf den Galapagosinseln sind ein typisches Beispiel für adaptive Radiation aus einer einzigen Ursprungsart.

**Antarktischer Zirkumpolarstrom:** Der Südozean ist von den nördlicher gelegenen Ozeanen hydrographisch durch den antarktischen Zirkumpolarstrom getrennt. Dieser Wasserkörper ist weniger salzhaltig als die Regionen nördlich und südlich und deutlich kälter als die nördlicheren Strömungen. Der Zirkumpolarstrom wird durch Westwinde angetrieben und strömt in östliche Richtung. Er bewegt erhebliche Wassermassen und ist wichtig für das globale System der Meeresströmungen.

**Bathymetrie:** Vermessung der Gestalt des Meeresbodens zur Erzeugung von z. B. Karten, Tiefenprofilen und 3-D-Modellen.

In der Tiefsee gibt es folgende Zonierungen:

**Bathyal** – Meeresboden am Kontinentalhang von 200 bis ca. 4.000 Metern Tiefe. In der Antarktis liegt der Schelf allerdings deutlich tiefer und der Kontinentalhang beginnt erst zwischen 400 und 800 Metern (Abbildung 2).

**Abyssal** – Tiefseeebenen auf 4.000–6.000 Metern Tiefe

**Hadal** – 6.000 bis über 10.000 Metern Tiefe (die tiefsten Punkte der Ozeane liegen in Grabensystemen)

**Benthos, benthonisch:** Alle im, auf oder über dem Boden eines Gewässers vorkommenden Lebewesen. Beispiel: Zum Benthos gehörende (benthonische) Ruderfußkrebse sind an den Lebensraum „Meeresboden“ gebunden, während planktonische Ruderfußkrebse im freien Wasser leben.

**Eurybathie, eurybath:** Als „eurybath“ bezeichnet man Arten, deren geographische Verbreitung große Tiefenspannen abdeckt. Also z. B. Arten, die vom Schelf bis zum Abyssal vorkommen.

**Polynya:** Bezeichnet eine eisfreie Wasserfläche in ansonsten von Meereis bedeckten Gebieten. Polynyas entstehen aufgrund von Gezeiten, vorherrschenden Winden oder dem Auftrieb von warmem Tiefenwasser. In der Antarktis sind Polynyas wichtige Wasserwege für Meeressäuger und bieten einen Nahrungszugang für Seevögel. In den oft dauerhaft bestehenden Polynyas kann es im Vergleich zu den eisbedeckten Gebieten zu einer hohen Primärproduktion in der Wassersäule kommen.

*have been discovered, distribution ranges adapted and systematic relationships redefined. Deep-sea species also occur on the Antarctic shelf because it is deeper than that of other continents. Conditions under ice shelves are similar to those in the deep sea, which is why typical deep-sea communities and species also occur in these regions.*

## Schlagworte:

Antarktis, Tiefsee, Biodiversität, Meeresboden, Expeditionen.

## Literatur

- [1] B. Beszteri et al. (2020). Kleinlebewesen im sich wandelnden Südpolarmeer – Polares Plankton. *Biol. Unserer Zeit* 50(1), 28–35.
- [2] maribus [Hrsg.] (2019). *World Ocean Review*. 6 Arktis und Antarktis – extrem, klimarelevant, gefährdet. 329 S., <https://worldoceanreview.com/de/wor-6/>
- [3] D. Kohlbach et al. (2018) Dependency of Antarctic zooplankton species on ice algae-produced carbon suggests sea ice-driven ecosystem during winter. *Glob Change Biol* 24(10), 4667–4681.
- [4] G. Veit-Köhler et al. (2011). Antarctic deep-sea meiofauna and bacteria react to the deposition of particulate organic matter after a phytoplankton bloom. *Deep Sea Res II* 58, 1983–1995.
- [5] P. K. Dayton et al. (2013). Recruitment, Growth and Mortality of an Antarctic Hexactinellid Sponge, *Anoxycalyx joubini*. *PLoS ONE* 8(2), e56939.
- [6] A. S. Plotkin, D. Janussen (2007). New genus and species of Polymastiidae (Demospongiae: Hadromerida) from the Antarctic deep sea. *J Mar Biol Ass UK* 87, 1395–1401.
- [7] H. T. Rapp et al. (2011). Calcareous sponges from abyssal and bathyal depths in the Weddell Sea, Antarctica. *Deep Sea Res II* 58, 58–67.
- [8] M. Dressler-Allame et al. (2017). Carnivorous sponges (Cladorhizidae) of the deep Weddell Sea, with descriptions of two new species. *Deep Sea Res II* 137, 190–206.
- [9] A. Brandt et al. (2007). First insights into the biodiversity and biogeography of the Southern Ocean deep sea. *Nature* 447, 307–311.
- [10] F. Li et al. (2020). New discorhabdin B dimers with anticancer activity from the Antarctic deep-sea sponge *Latrunculia bififormis*. *Mar Drugs* 18, 107.
- [11] W. Brökeland, M. J. Raupach (2008). A species complex within the isopod genus *Haploniscus* (Crustacea: Malacostraca: Peracarida) from the Southern Ocean deep sea: a morphological and molecular approach. *Zool J Linn Soc* 152, 655–706.
- [12] B. Hilbig (2004). Polychaetes of the deep Weddell and Scotia Seas – composition and zoogeographical links. *Deep Sea Res II* 51(14), 1817–1825.
- [13] K. Linse et al. (2006). Biodiversity and biogeography of Antarctic and sub-Antarctic mollusca. *Deep Sea Res II* 53(8–10), 985–1008.
- [14] A. Brandt et al. (2016). Depth-related gradients in community structure and relatedness of bivalves and isopods in the Southern Ocean? *Prog Oceanogr* 144, 25–38.
- [15] M. Schrödl et al. (2006). Review on the distribution and biology of Antarctic Monoplacophora, with first abyssal record of *Laevipilina antarctica*. *Polar Biol* 29, 721–727.
- [16] H. Gheerardyn, G. Veit-Köhler (2009). Diversity and large-scale biogeography of Paramesochridae (Copepoda, Harpacticoida) in South Atlantic abyssal plains and the deep Southern Ocean. *Deep Sea Res I* 56(10), 1804–1815.
- [17] A. Mathiske et al. (2021). Deep sea without limits – four new closely related species of *Emertonia* Wilson, 1932 (Copepoda: Harpacticoida: Paramesochridae) show characters with a world-wide distribution. *Zootaxa* 5051(1), 443–486.
- [18] D. Kersken et al. (2014). The infauna of three widely distributed sponge species (Hexactinellida and Demospongiae) from the deep Ekström Shelf in the Weddell Sea, Antarctica. *Deep Sea Res II* 108, 101–112.
- [19] M. V. Malyutina, A. Brandt (2015). The first data on the composition and distribution of Munnopsidae (Crustacea, Isopoda, Asellota), collected during the Kurambio expedition 2012 from the Kuril-Kamchatka Trench area. *Deep Sea Res II* 111, 245–256.

- [20] G. Veit-Köhler (2004). *Kliopsyllus andeep* sp. n. (Copepoda: Harpacticoida) from the Antarctic deep sea – a copepod closely related to certain shallow-water species. *Deep Sea Res II* 51(14–16), 1629–1641.
- [21] A. Brandt (1991). Zur Besiedlungsgeschichte des antarktischen Schelfes am Beispiel der Isopoda (Crustacea, Malacostraca). *Ber Polarforsch* 98, 1–240.
- [22] T. Riehl et al. (2020). Conquering the ocean depths over three geological eras in: The natural history of the Crustacea – Evolution and Biogeography. (Hrsg.: G. C. B. Poore, M. Thiel), Oxford University Press 155–182.
- [23] S. Vargas et al. (2017). Nuclear and mitochondrial phylogeny of *Rossella* (Hexactinellida: Lyssacinosida, Rossellidae) a species and a species flock in the Southern Ocean. *Polar Biol* 40, 2435–2444.
- [24] T. Brey et al. (1996). Do Antarctic benthic invertebrates show an extended level of eurybathy? *Antarct Sci* 8(1), 3–6.
- [25] J. Gutt et al. (2011) Biodiversity change after climate-induced ice-shelf collapse in the Antarctic. *Deep Sea Res II* 58(1–2), 74–83.
- [26] D. Buskowiak, D. Janussen (2021). An exceptional occurrence of deep-sea sponges in the region of former Larsen Ice Shelves, Antarctic Peninsula, with the description of two new species. *Mar Biodivers* 51, 8.
- [27] A. Rose et al. (2015). Long-term iceshelf-covered meiobenthic communities of the Antarctic continental shelf resemble those of the deep sea. *Mar Biodiv* 45(4), 743–762.
- [28] J. Kottmann et al. (2013). A new species of *Wellsopsyllus* (Copepoda, Harpacticoida, Paramesochridae) from the deep Southern Ocean and remarks on its biogeography. *Helgol Mar Res* 67, 33–48.
- [29] L. Fillinger et al. (2013). Rapid glass sponge expansion after climate-induced Antarctic ice shelf collapse. *Curr Biology* 23(14), 1330–1334.
- [30] D. Kersken et al. (2016). Sponge communities of the Antarctic Peninsula - Influence of environmental variables on species composition and richness. *Polar Biol* 39, 851–862.
- [31] M. J. Brasier et al. (2021). Responses of Southern Ocean seafloor habitats and communities to global and local drivers of change. *Front Mar Sci* 8, 622721.
- [32] D. Di Franco et al. (2020). Abundance and distributional patterns of benthic peracarid crustaceans from the Atlantic sector of the Southern Ocean and Weddell Sea. *Front Mar Sci* 7, 554663.
- [33] G. Veit-Köhler et al. (2018). Oceanographic and topographic conditions structure benthic meiofauna communities in the Weddell Sea, Bransfield Strait and Drake Passage (Antarctic). *Prog Oceanogr* 162, 240–256.

### Verfasst von:



Foto: Gritta Veit-Köhler

Dr. Gritta Veit-Köhler ist seit 2002 Fachgebietsleiterin für „Ökologische Biodiversitätsforschung“ am Deutschen Zentrum für Marine Biodiversitätsforschung (DZMB) bei Senckenberg am Meer in Wilhelmshaven. Zu ihren Forschungsschwerpunkten gehören die Ökologie der Meiofauna und die Taxonomie von bodenlebenden Ruderfußkrebsen. Gemeinsam mit ihren Student/-innen erforscht sie Polargebiete, die Tiefsee und strandnahe Lebensräume.



Foto: Cédric d'Udekem d'Acoz

PD Dr. Dorte Janussen ist seit 2001 Leiterin der Sektion „Marine Evertebraten I“ des Forschungsinstituts Senckenberg in Frankfurt am Main. Ihre Forschungsschwerpunkte sind die Taxonomie, Zoogeographie und Evolution der Schwämme, insbesondere in der Tiefsee und Polarregionen.



Foto: Victoria Whadley

Prof. Dr. Angelika Brandt ist 2017 nach 22 Jahren am Zoologischen Museum der Universität Hamburg an das Senckenberg Forschungsinstitut und Naturmuseum gewechselt, wo sie die Abteilung Marine Zoologie leitet. Sie erforscht die Makrofauna der Tiefsee und Polarregionen, hat bisher 29 Expeditionen durchgeführt und mehr als 400 Publikationen verfasst. Für die UN Dekade für Ozeanforschung und Nachhaltige Entwicklung vertritt A. Brandt die Mission „Clean Ocean“ mit einem internationalen Team.

### Korrespondenz

Dr. Gritta Veit-Köhler  
Senckenberg am Meer  
Deutsches Zentrum für Marine Biodiversitätsforschung  
Südstrand 44  
26382 Wilhelmshaven  
E-Mail: gveit-koehler@senckenberg.de



## Ökologische Nischen für Pioniere in der Atacama

# Die Grüne Wüste Südamerikas?

KAREN BAUMANN | PATRICK JUNG | LUKAS W. LEHNERT | ELENA SAMOLOV |  
CHRISTEL BAUM | JÖRG BENDIX | ULF KARSTEN | BURKHARD BÜDEL | PETER LEINWEBER

*Cyanobakterien, Grünalgen und Flechten sind uralte Pionierorganismen. Auch in Wüsten können sie Fuß fassen, selbst wenn vermeintlich kein Wasser zur Verfügung steht, um Photosynthese zu betreiben. Wie perfekt sie an das Leben in der Atacama-Wüste Chiles angepasst sind und welche Strategien sie entwickelt haben, um an das benötigte Wasser und ausreichend Nährstoffe zu kommen, war in den letzten Jahren Gegenstand gleich mehrerer, von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderter Projekte.*

Die Atacama ist eine der ältesten Wüsten und einer der extremsten Standorte auf unserem Planeten. Sie erstreckt sich über 3.500 km entlang der Pazifikküste Perus und Chiles und umfasst ein Gebiet von über 200.000 km<sup>2</sup> [1]. Während die Temperaturen in der Atacama mit Werten zwischen +9 und +28 °C vergleichsweise mild sind, bringt besonders der äußerst geringe und unbeständige

Niederschlag das Leben hier an seine Grenzen [1]. Im Norden Chiles sind es im Durchschnitt weniger als 1 mm, in der südlichen Atacama bis zu 130 mm im Jahr. An manchen Stellen wurde noch nie Niederschlag gemessen. Im Vergleich dazu beträgt der jährliche Niederschlag in Deutschland im Schnitt etwa 800 mm.

Wie aber kommt es dazu, dass eine Region zwischen Pazifik und den Anden kaum Niederschlag erhält? Grund hierfür sind die ablandigen Winde des Südostpassats. Durch sie werden warme, höherliegende Luftmassen vom Land über tieferliegende Meeresluftmassen gelegt, die durch den Humboldtstrom kaltfeucht sind. Ein Aufstieg von niederschlagsbringenden Wolken wird damit verhindert.

Nur in Jahren mit dem Klimaphänomen *El Niño*, in denen durch schwächere Passatwinde die kalten Wassermassen des Humboldtstroms durch wärmere verdrängt werden, kann es lokal zu einzelnen stärkeren Niederschlagsereignissen kommen – so zuletzt in der südlichen Atacama im Jahr 2015. Hier wurde örtlich die für die Region außergewöhnliche Menge von über 80 mm Niederschlag gemessen. Dies führte allerdings zu starker Landerosion durch Oberflächenabtrag und nur kurzzeitig zu blühenden Landschaften. Von welchem Wasser aber lebt die Wüste in den trockenen Jahren? Und welche Strategien haben die Organismen entwickelt, um an Nährstoffe zu gelangen?

Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite 64 erklärt.

## Die Nebeloase

Wenn auch nicht durch Regen, so erhalten höhergelegene Küstenregionen der Atacama doch einen bedeutenden Wassereintrag durch Nebel, der durchschnittlich bei erstaunlichen 0,125 mm am Tag liegt [2]. Die feuchtkalte Meeresluft strömt dabei vom Pazifik ins Landesinnere, und Wasser kondensiert in feinsten Tröpfchen als Nebel, *camanchaca* („Finsternis“), wie ihn die Einheimischen nennen. Dadurch entstehen regelrechte „Nebeloasen“ in der Landschaft. Eine davon liegt im Nationalpark „Pan de Azúcar“ („Zuckerhut“) in der südlichen Atacama, dessen 438 km<sup>2</sup> große Fläche unter Schutz gestellt ist (Abbildung 1a). Hier ragt ein steiles Hochplateau direkt an der Küste bis 850 m über den Meeresspiegel, das zum Landesinneren hin ausläuft. In der hügeligen Landschaft ist das granitische Ausgangsgestein in weiten Bereichen bereits teilweise verwittert und der beige-braune Rohboden ist großflächig mit kleinen, meist nur etwa einen halben Zentimeter großen Quarzsteinchen übersät, die lokal ‚maicillo‘ genannt werden (Abbildung 1b).

Obwohl flüssiges Wasser und verfügbare Nährstoffe in dieser unwirtlichen Gegend rar sind, wachsen hier neben kleinen Büschen und einjährigen Pflanzen auch ► Geophyten – zumindest in Küstennähe. Für das Auge weithin sichtbar prägen Kakteen aus den Gattungen *Echinopsis*, *Eulychnia* und *Copiapoa* mit ihren langen Dornen das Bild der Nebelwüste (Abbildung 1). Mit diesen dichtstehenden Blattdornen halten sie nicht nur hungrige Fressfeinde auf Abstand. Gleichzeitig siedelt auf ihnen eine Vielzahl verschiedenster Flechtenarten (Abbildung 1c–e). Mit ihrer zum Teil bartartigen Wuchsform „kämmen“ sie die Nebeltröpfchen regelrecht aus der Luft aus. Das von ihnen selber nicht sofort aufgenommene Wasser tropft von dort praktischerweise direkt in den Wurzelbereich der Kakteen.

## Cyanobakterien beleben Gestein

Cyanobakterien (früher bekannt als Blaualgen) und Grünalgen leben frei oder in Symbiose mit Pilzen. Ihr Auftreten und ihre Artenzusammensetzung in der Wüste sind besonders interessant, da sie als Sauerstoff produzierende Pionierorganismen bereits seit Millionen von Jahren unser Klima mitgestalten. Selbst im Extremklima von Wüsten kommen sie vor [3]. Aus der Atacama sind bislang nur wenige Cyanobakterienarten bekannt. Allerdings wurde bereits 1960 das große Potenzial unbekannter Cyanobak-

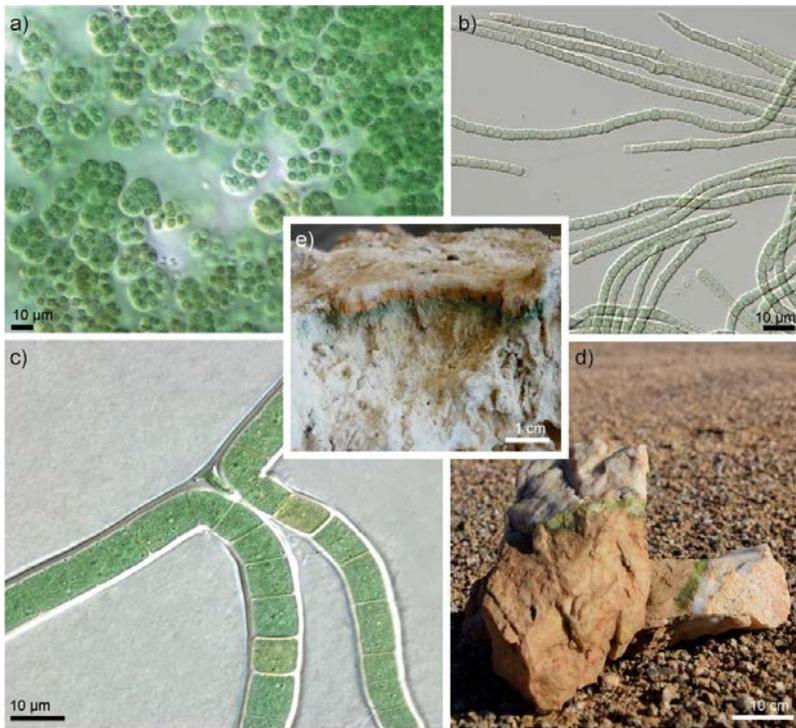


**ABB. 1** Fauna und Flora des Nationalparks „Pan de Azúcar“ in der küstennahen Atacama-Wüste Chiles. a) Landschaftsaufnahme. b) Mit Quarzsteinchen bedeckter Wüstenboden. c) Säulenförmiger Kaktus *Copiapoa cinerea* subsp. *columna-alba* mit gelbem Flechtenschild der Gattung *Chrysothrix*. d) Euphorbienbusch (*Euphorbia lactiflua*) besetzt mit verschiedenen Flechten. e) Spitze einer *Eulychnia* sp.-Kaktee, deren Dornen mit buschigen Flechten der Gattung *Ramalina* und *Usnea* besetzt sind sowie *Roccellinastrum spongioideum* an den Dornenspitzen. Fotos: a, c) K. Baumann, b, d–e) P. Jung.

terienarten in Chile und insbesondere in der Atacama erkannt [4]. Neu entdeckt wurden jetzt die einzellige Art *Aliterella chasmolithica* (Abbildung 2a), die aus natürlichen Ritzen des Granitgesteins isoliert wurde, sowie die an Quarzsteinen vorkommenden Arten *Gloeocapsopsis diffluens* und *G. dulcis* [5]. Die ► filamentöse (fadenförmige) Art *Kastovskya adunca* (Abbildung 2b), welche in Gips vorkommt, und die Stickstoff-fixierende Art *Scytonema hyalinum* (Abbildung 2c) wurden hingegen im Boden angetroffen.

## IN KÜRZE

- Im Nationalpark Pan de Azúcar in der südlichen Atacama-Wüste leben zahlreiche Cyanobakterien, Grünalgen und Flechten, die Teil **biologischer Bodenkrusten** sind.
- Durch morphologische Anpassungen und den **weltweit geringsten Wasserbedarf** können sie im Extremklima der trockensten Wüste der Erde überleben.
- Die **außergewöhnlich hohe Enzymaktivität** dieser Pionierorganismen deutet auf einen effizienten Aufschluss von Nährstoffen hin.
- Durch Verwitterungsaktivität tragen diese Organismen **zur Bodenbildung** bei und formen die Landschaft mit.
- Die Entstehung des **schwarz-weißen Musters** in der Landschaft durch die „grit crust“ ist bislang ungeklärt und bedarf weiterer Erforschung.



**ABB. 2** Cyanobakterien und ihre Habitate. **a)** Einzellige *Aliterella chasmolithica*. **b)** Filamentöse *Kastovskya adunca*. **c)** Verzweigte *Scytonema hyalinum* mit zwei gelbgrün gefärbten Heterozyten zur Stickstofffixierung. **d)** Ausgegrabene Quarzsteine mit grünem Biofilm, der von zahlreichen Cyanobakterien und Grünalgen gebildet wird. **e)** Angeschlagener Gipsblock mit blaugrünem Biofilm wenige Millimeter unter der Oberfläche. Fotos: P. Jung.

Als eine der ältesten Lebensformen besitzen Cyanobakterien keinen Zellkern und gehören somit zu den Prokaryonten. Sie betreiben Photosynthese und verringern damit auch die Konzentration von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) in der Atmosphäre. Gleichzeitig produzieren sie Zucker und, als Abfallprodukt, Sauerstoff (O<sub>2</sub>). Viele von ihnen fixieren zudem Stickstoff (N) aus der Luft und machen auf diese Weise dieses Nährelement spätestens nach ihrem

Ableben auch anderen Lebewesen zugänglich. Durch einzigartige Pigmente können Cyanobakterien sogar die Lichtausnutzung für die Photosynthese steigern. Dies hat den Vorteil, dass einige Cyanobakterien auch in porösem Gipsgestein einige Millimeter unter der Oberfläche leben (endolithisch) oder an der Unterseite lichtdurchlässiger Quarzsteine (hypolithisch) siedeln können (Abbildung 2d). Der Quarzstein bietet dabei Schutz vor zu hoher zellschädigender UV-Strahlung der Wüstenbreiten und stellt zudem eine besonders günstige Wasserversorgung bereit: Da der Stein nachts schneller abkühlt als die ihn umgebende Luft, wird an der Grenzfläche zum Stein die Luft zum Taupunkt abgekühlt und damit Tau als flüssiges Wasser ausgefällt. Diese Wassermengen reichen gerade für Cyanobakterien und Grünalgen zum Leben aus. Cyanobakterien sind Pioniere in der Erschließung von Mikrohabitaten wie etwa den ersten Millimetern des Bodens, Gips (Abbildung 2e), Ritzen im Gestein oder der Unterseite von Quarzsteinchen. Sie ermöglichen die Ansiedlung weiterer zahlreicher ▶ heterotropher Mikroorganismen, die von ihren Stoffwechselprodukten leben können.

### Grünalgen in Flechten: Auf Kakteen und am Boden

Im Gegensatz zu Cyanobakterien haben Grünalgen wie beispielsweise *Trebouxia* sp. einen echten Zellkern und werden damit den Eukaryonten zugerechnet. Sie sind ebenfalls in der Lage, Photosynthese zu betreiben. Allerdings fehlt ihnen die Möglichkeit, Stickstoff direkt aus der Luft zu nutzen. Sie sind damit auf anderweitige Versorgung mit Nährstoffen angewiesen. Im Nationalpark „Pan de Azúcar“ spielen Grünalgen vor allem als Symbiosepartner in Flechten eine entscheidende Rolle. In der Alge-Pilz-Symbiose übernehmen sie als Photobiont durch Photosynthese die Produktion von Zuckern, während der Mykobiont – der Pilzpartner – Nährstoffe wie z. B. Phosphat erschließt und verfügbar macht.

## IDENTIFIZIERUNG VON MIKROORGANISMEN

Die nur wenige hundertstel Millimeter großen Cyanobakterien und Grünalgen bestimmen Forscher unter dem Lichtmikroskop morphologisch, also nach ihrem äußeren Aufbau. Um Sicherheit zu erlangen, werden einzelne Organismen dann in einer Petrischale mit verfestigtem Nährboden vermehrt und nach serieller Übertragung auf neue Nährmedien vereinzelt. Nach einigen Monaten ist eine Cyanobakterien- oder Grünalgen-Kultur entstanden, die jetzt mit molekularbiologischen Methoden untersucht wird. Zunächst wird die DNA, das Erbgut, aus den Cyanobakterien oder Grünalgen isoliert und mit Hilfe der Polymerasekettenreaktion (PCR = engl. Polymerase Chain Reaction) vervielfältigt. Eine anschließende Sequenzierung verrät die Reihenfolge der einzelnen Nukleotidbausteine. Ein sogenannter BLAST (Basic Local Alignment Search Tool), ein Algorithmus zum Vergleich von Sequenzen, bestimmt dann die Ähnlichkeit der neuen mit bereits bestehenden DNA-Sequenzen aus der Gendatenbank von bekannten Organismen. Die Verwandtschaftsverhältnisse der einzelnen Algen

können anhand ihrer DNA-Sequenzen in phylogenetischen Stammbäumen errechnet und graphisch dargestellt werden. Finden sich hierbei Unterschiede in bestimmten DNA-Abschnitten oder deren Aufbau/Morphologie, kann unter Abgleich mit bestehender Literatur eine neue Art benannt und beschrieben werden.

Nach demselben Prinzip erfolgt auch die Benennung von Flechten, wobei hier Mikroalge und Pilzpartner der Symbiose getrennt bestimmt werden. Im Nationalpark „Pan de Azúcar“ wurden mehrere neue Cyanobakterien- und Grünalgenarten sowie Flechten entdeckt. Darunter eine gelblich-grün erscheinende, den Boden besiedelnde Flechte, die den Namen „Acarospora conafii spec. nov. P. Jung et B. Büdel“ erhielt. Dabei bezeichnet *Acarospora* die Gattung des flechtenbildenden Pilzes, *conafii* wurde zu Ehren der chilenischen Forstbehörde CONAF (Corporación Nacional Forestal) als Flechten-Artbezeichnung angehängt. „P. Jung et B. Büdel“ verweist auf die beiden erstbeschreibenden Forscher.

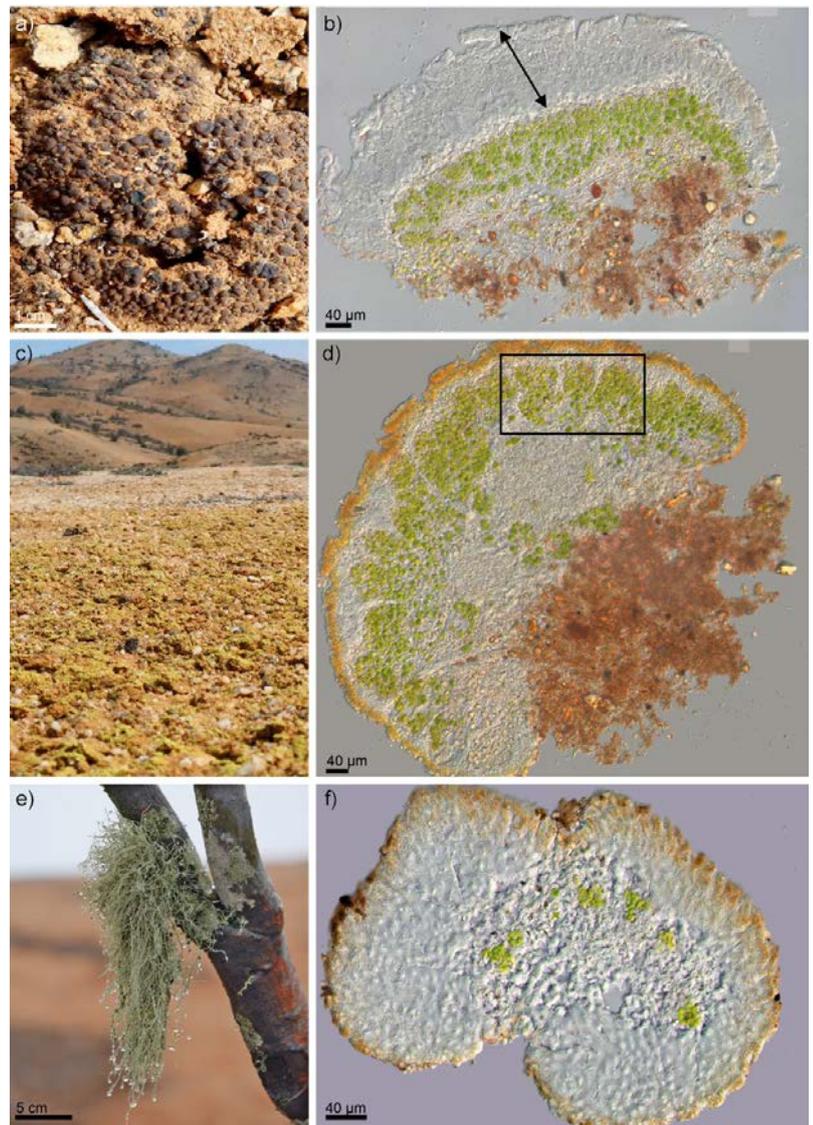
Flechten, die auf Kakteen aufsitzen, sogenannte Epiphyten, kommen in besonders großer Vielfalt im Nationalpark vor. Aber auch auf dem Boden lebt eine große Fülle von Flechten (Abbildung 3a-d). Interessanterweise können epiphytische Flechten wie *Everniopsis trulla* oder *Ramalina thrausta* (Abbildung 3e, f) bereits hohe Luftfeuchtigkeit um die 90 Prozent zur Photosynthese nutzen [6]. Sie sind damit viel weniger abhängig von Nebel, Tau oder Regen als ihre bodennahen Verwandten. Trotzdem sind sie, ebenso wie die auf dem Boden wachsenden Flechten *Placidium* sp. oder *Acarospora conafii* (erst kürzlich entdeckt; siehe Kasten) auf flüssiges Wasser aus Nebeltröpfchen angewiesen, denn nur der Nebel tritt tatsächlich regelmäßig auf.

Bereits drei Minuten nach dem Auftreten von Nebel erreichen einige der Flechten schon über 27 Prozent ihrer maximalen Photosyntheseleistung [6]. Dabei können sie aus einem Nebelereignis insgesamt zwischen 8 und 24 Prozent des verfügbaren Wassers aufnehmen [7]. Flechten wie *Placidium* sp. zeigen noch eine weitere Anpassung: Sie sind von einer dicken Schicht abgestorbener Pilzzellen umgeben, der sogenannten „epinekralen Schicht“ (Abbildung 3b). Wie ein Schwamm saugt diese Wasser auf, und die Flechte kann so ihre photosynthetisch aktive Zeit verlängern. Damit nutzen die Organismen jede Möglichkeit in der trockenen Umgebung, Wasserquellen optimal auszuschöpfen. Eine weitere erstaunliche Anpassung an dieses unwirtliche Ökosystem ist die Ausbildung von Algenstapeln (Abbildung 3d). Hier sind die Algen nicht, wie für Flechten üblich, als ein grünes horizontales Band angeordnet, sondern in vertikalen Stapeln. Dadurch wird die überwiegende Anzahl an Grünalgen vor Starklicht geschützt, das maximal die dem Algenstapel oben aufliegenden Algenzellen schädigen kann.

### Mikrobielle Lebensgemeinschaft als Landschaftsbildner

Obwohl sie eine der wohl wichtigsten Lebensgemeinschaften in der Atacama darstellt, lässt sie sich auf den ersten Blick kaum erkennen – die biologische Bodenkruste, die auf tausenden von kleinen Quarzsteinchen wächst, welche die Oberfläche der Wüste im Nationalpark „Pan de Azúcar“ bedecken (Abbildung 4a). Bei Trockenheit ist die erst kürzlich entdeckte und als „grit crust“ bezeichnete Kruste nur an einer etwas dunkleren Färbung der durch Mikroorganismen besiedelten Steinchen im Vergleich zu unbesiedelten Stellen erkennbar (Abbildung 4a). Erst bei Nebel werden die einzelnen Organismen unmittelbar aktiv. Der gräuliche Thallus der Flechten quillt dann durch die Aufnahme von Nebelwasser auf und erzeugt innerhalb weniger Minuten eine deutliche schwarz-grüne Färbung der Steinchen, und die Photosynthese der Flechten, Cyanobakterien und Grünalgen startet (Abbildung 4b–d).

Jedes einzelne Steinchen ist hier ein ganzer Mikrokosmos, auf dem unzählige Arten von Flechten und auch freilebenden Cyanobakterien und Grünalgen leben (Abbil-



**ABB. 3** Flechten im Detail. a) Aufsicht von *Placidium* sp. b) Mikroskopischer Querschnitt von *Placidium* sp. mit Grünalgen-Photobionten der Gattung *Trebouxia*. Der Pfeil zeigt die Mächtigkeit der wasserspeichernden Epinekralschicht aus abgestorbenen Pilzhyphen. c) Die gelbgrüne *Acarospora conafii*. d) Mikroskopischer Querschnitt von *A. conafii* mit dem Grünalgen-Photobionten *Trebouxia* sp., Algenstapel in Umrahmung. e) Die epiphytische *Ramalina thrausta* tropfnass nach Nebel. f) Mikroskopischer Querschnitt eines runden Thallusstücks von *R. thrausta*. Fotos: a–d) P. Jung, e) K. Baumann, f) P. Jung, d–f aus [6].

dung 4c, d). Die enge Vergesellschaftung von ► phototrophen Mikroorganismen stellt auch hier die Grundlage für die zusätzliche Ansiedlung von heterotrophen Mikroorganismen wie Bakterien und Pilzen dar (Abbildung 4e, f). Die Diversität der vorkommenden Mikroorganismen ist dabei noch nicht einmal ansatzweise erforscht. Fakt ist, dass diese Organismen durch ihr Wachstum die vielen Einzelsteinchen miteinander verbinden und auf diese Weise eine Kruste bilden können, die den Boden vor Winderosion schützt. Untersuchungen zeigten, dass die „grit crust“ signifikant zum Kohlenstoffgehalt des Bodens beiträgt. Der

Gehalt an organischem Kohlenstoff liegt dort, wo die „grit crust“ verbreitet ist, zurzeit bei 3 g C<sub>org</sub> pro Quadratmeter im obersten Bodenzentimeter [2]. Wie weit aber ist sie tatsächlich verbreitet? Drohnenflüge sollten hierzu Auskunft geben. Auf Aufnahmen ihrer Kameras war das schwarz-weiße Muster in der Wüste, das besiedelte und unbesiedelte Flächen hervorrufen, deutlich erkennbar. Mittels digitaler Berechnungen ergab sich dabei für den Nationalpark „Pan de Azúcar“ eine Fläche von 350 km<sup>2</sup>,

die mit den kleinen Steinchen bedeckt war. Einzelne Steinchen waren dabei zwischen 20 und 80 Prozent mit Organismen besiedelt. Insgesamt waren demzufolge 88 km<sup>2</sup> des Nationalparks (25 % der Gesamtfläche) reine „grit crust“ [2].

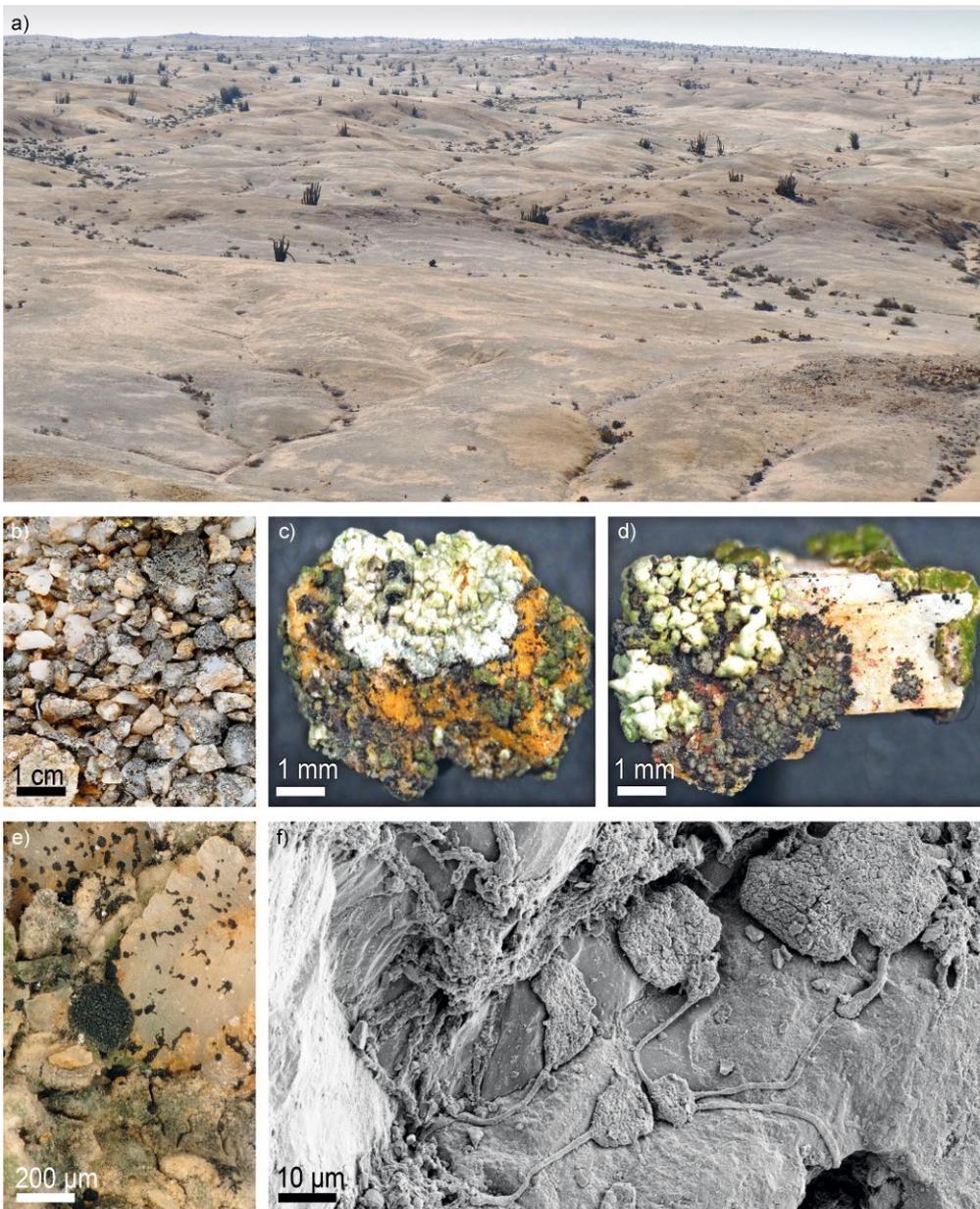
Die starke Verbreitung an einem solch unwirtlichen Ort lässt auf eine optimale ökophysiologische Anpassung der beteiligten Mikroorganismen schließen. Die maximale Photosyntheseleistung der „grit crust“-Lebensgemeinschaft

konnte im Laborexperiment, in dem die „grit crust“ nach totaler Wassersättigung schrittweise ausgetrocknet wurde, bei 0,250 mm Wasser festgestellt werden. Dieses ist die weltweit geringste bekannte Wassermenge, die für Photosynthese von vergleichbaren Organismen benötigt wird. Da durchschnittlich 0,125 mm Wasser am Tag aus Nebelereignissen im Nationalpark „Pan de Azúcar“ zur Verfügung stehen, erbringt die „grit crust“ hier zumeist immerhin 65 Prozent ihrer vollen Photosyntheseleistung [2].

Ein Großteil des in der „grit crust“ fixierten Kohlenstoffs wird in organische aromatische Verbindungen eingebaut. Viele dieser Substanzen sind hydrophob, also Wasser abweisend. Dies erscheint zunächst als Widerspruch, ist aber tatsächlich von vielen Biokrusten trockener Ökosysteme bekannt [8]. Indem die Organismen einen Überschuss an Wasser abweisen, verhindern sie einen Abfall der Photosyntheseleistung, der auch bei einem Überschuss an Wasser auftritt, da der Wasserfilm den Gasaustausch während der Photosynthese hemmt. Die „grit crust“ ist somit perfekt an die Gegebenheiten in der Wüste angepasst. Es bleibt lediglich die Frage, wie sich die Organismen auf diesen Steinchen „ernähren“. Denn schließlich brauchen sie auch Nährelemente wie Kalium, Calcium, Magnesium oder Phosphor.

### Nährstoffakquise

Anders als wir es beispielsweise aus Wäldern der gemäßigten Breiten kennen, sind in Wüstenökosystemen noch keine dicken humosen Schichten im Oberboden ausgebildet, die als Nährstoffspeicher und -reservoir dienen könnten. In Wüsten müssen daher die meisten der benötigten Nähr-



**ABB. 4** Die „grit crust“ im Nationalpark. a) Landschaftsaufnahme, die schwärzliche Flecken zeigt, wo die „grit crust“ sich ausbreitet. b) Die Nahaufnahme der „grit crust“ lässt erkennen, dass die hellen Quarzsteinchen durch mikrobiellen Bewuchs dunkel erscheinen. c, d) Detailaufnahmen einzelner Grit-Steine, die stark von verschiedenen Flechten bewachsen sind. e) Detailaufnahme eines Grit-Steinchens mit schwarzem Bewuchs von heterotrophen Pilzen der Ascomycetengattung *Lichenothelia*. f) Rasterelektronenmikroskopie der Grit-Oberfläche mit runden neuetablierten Thalli der *Lichenothelia*-Pilze, die mit ihren Ausläuferhyphen Nährstoffe erschließen. Fotos: P. Jung.

stoffe noch direkt aus dem Gestein herausgelöst werden. Dies können Pionierorganismen besonders gut und machen ihrem Namen damit alle Ehre. Die Pilzpartner von „grit crust“-Flechten wurden dabei beobachtet, wie sie bei der Erschließung von Nährstoffen mit ihren Hyphen tief ins Gestein eindringen (Abbildung 5a). Nicht immer aber müssen die Organismen lange in der Tiefe suchen. Auch durch Staub werden Nährstoffe bereitgestellt. In der Atacama können es in einem Monat bis zu 4 g Staub pro Quadratmeter mit beispielsweise 0,4 Prozent Phosphor sein [9, 10].

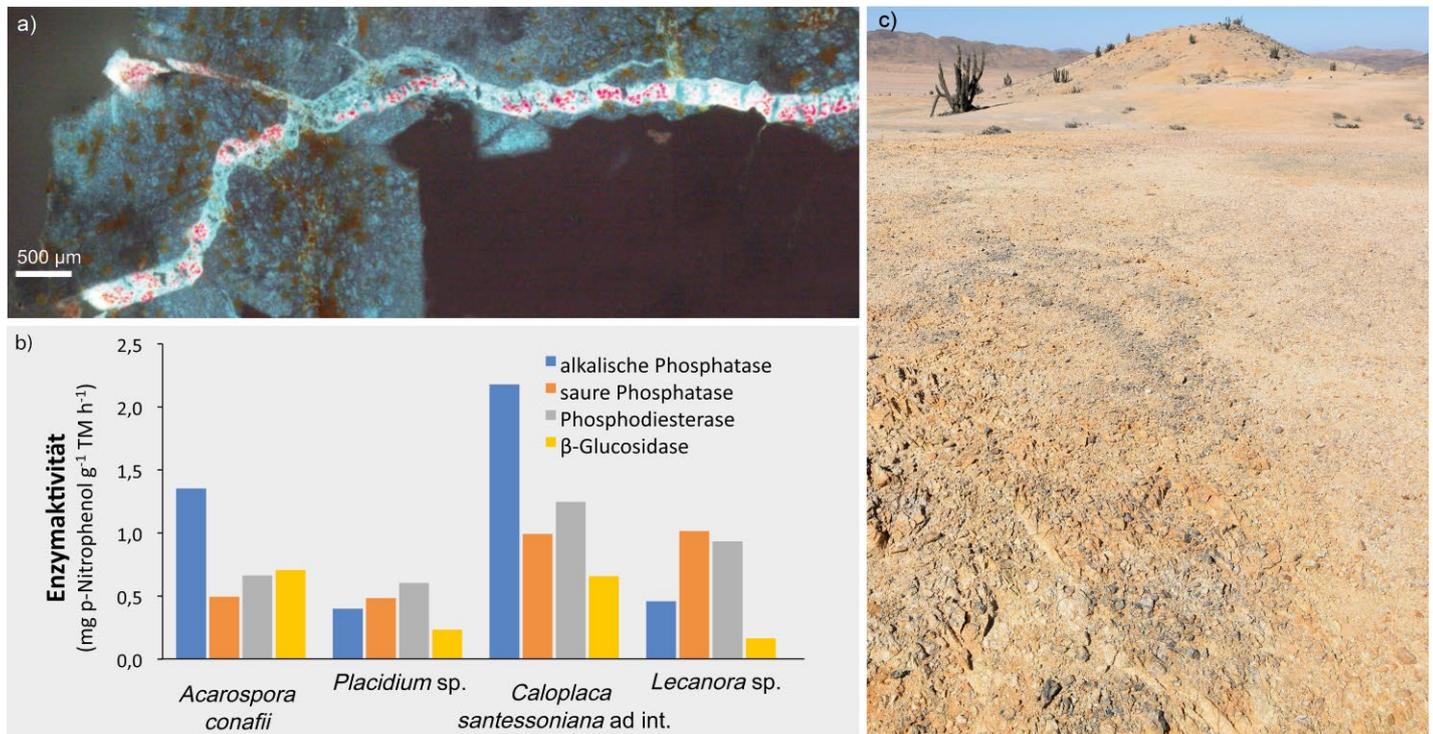
Um einzelne Nährstoffe aus größeren Molekülkomplexen herauszulösen, produzieren Organismen Enzyme und scheiden diese aus. Ein Beispiel hierfür sind Phosphatasen. Diese Eiweiße katalysieren die Abspaltung von Phosphat aus großen Molekülen. Die Abspaltung des Einfachzuckers Glucose von Mehrfachzuckern erfolgt durch Glucosidasen. Unterschiedliche Flechtenarten der Atacama zeigen ganz unterschiedliche Enzymaktivitäten (Abbildung 5b). Besonders auffällig dabei ist, dass bei diesen Flechtenarten eine zum Teil mehr als 100-fach erhöhte Enzymaktivität, verglichen mit der Enzymaktivität normaler Bodenproben aus den gemäßigten Breiten, gemessen wurde. Dies deutet auf eine sehr große Menge an Enzymen und/oder eine sehr effiziente Wirkungsweise dieser Organismen im Aufschluss von Nährstoffen hin. Grund hierfür könnten die in der Wüste nur sehr kurzen Feuchtigkeitsphasen sein, in

denen dann aber so viel wie möglich an Nährstoffen für die Zellen in aufnehmbare Form gebracht werden muss.

### Das Nebenprodukt – Verwitterung

Während die Organismen Lebensraum und karge Nahrung nutzen, tragen sie bedeutend dazu bei, ihre Umgebung zu formen. Dies geschieht auf chemische und physikalische Weise. Einige Cyanobakterien und Grünalgen beispielsweise betreiben Photosynthese und alkalisieren dabei gleichzeitig ihre Umgebung durch das entstehende Nebenprodukt Hydroxid (OH<sup>-</sup>) [11]. Dieser Prozess spielt im Nationalpark „Pan de Azúcar“ eine besondere Rolle, da hier Quarz eines der häufigsten Minerale ist. Quarz wird bei pH-Werten jenseits 7,5 zunehmend stärker aufgelöst [12]. Gleichzeitig sind bei neutralem pH-Wert Eisen und Aluminium schlecht löslich und es kommt zur Bildung von Tonmineralen – kleinsten Bodenteilchen, an die Nährstoffe angelagert werden, die Feuchtigkeit halten und die aufquellen und schrumpfen können.

Auch Pilzhyphen sind an der Verwitterung von Gestein beteiligt. Je nach Feuchtigkeit wird durch Quellung und Schrumpfung ihrer Hyphen das Gestein regelrecht gesprengt (Abbildung 5a). Durch den zyklisch auftretenden Nebel in der küstennahen Atacama verändert sich die Oberfläche eines einzelnen mit Mikroorganismen bewachsenen Steinchens um bis zu 24 Prozent [10]. Somit wird



**ABB. 5** Verwitterungseffekte der „grit crust“. a) Dünnschliff eines Grit-Steinchens unter dem Fluoreszenzmikroskop mit Flechten, die von links nach rechts ins Innere des Steines gewachsen sind. Die Pilzhyphen erscheinen weißlich, die Grünalgen-Photobionten rötlich. b) Verschiedene Enzymaktivitäten vier verschiedener Flechten angegeben in Menge umgesetzten Substrats pro g Trockengewicht innerhalb einer Stunde. c) Landschaftsaufnahme, die im Vordergrund größere Felsstücke erkennen lässt, mit schwärzlichem mikrobiellem Besatz; im Hintergrund kleineres, stärker verwittertes Gestein mit der „grit crust“. Fotos: a) P. Jung, c) K. Baumann.

## GLOSSAR

**Filamentös:** fadenförmige Struktur

**Geophyten:** mehrjährige, krautige Pflanzen mit unterirdischen Überdauerungsorganen wie z. B. Zwiebeln

**Heterotroph:** sich nur durch bereits vorhandene organische Substanzen ernährend

**Phototroph:** Nutzung von Licht als Energiequelle

seit Jahrmillionen kompaktes Gestein langsam zerkleinert. Dieser Prozess kann quasi „im Zeitraffer“ in der Atacama beobachtet werden. Dafür muss man sich die in der Landschaft verteilten unterschiedlichen Verwitterungsstadien in chronologischer Abfolge als „Chronosequenz“ zusammengesetzt vorstellen (Abbildung 5c).

Mit der Besiedlung des Gesteins durch Organismen, seiner Zerkleinerung und Veränderung kommt es durch diverse Verwitterungsmechanismen allmählich zur Bodenbildung. In der heutigen Atacama ist an einigen Stellen bereits ein allererster Boden im eigentlichen Sinne entstanden, der als „terrestrischer Protopedon“ angesprochen wird [10]. Dieser Boden enthält Calciumcarbonat und hat bisher nur einen sehr geringen Gehalt an organischem Kohlenstoff in der obersten Schicht. Berücksichtigt man nun das nahezu stabile Klima der Atacama sowie die frühe Entstehungsgeschichte von Pilzen, Cyanobakterien, Grünalgen und Flechten, so lässt sich annehmen, dass diese biogenen Verwitterungsprozesse seit Millionen von Jahren in der Atacama stattfinden und so die Landschaft von den besiedelten Mikrohabitaten aus maßgeblich gestaltet wird.

Ähnliche, als biologische Bodenkrusten bezeichnete, mikrobielle Zusammenschlüsse kommen hauptsächlich in Trockengebieten der Erde vor. Dort können sie zu sehr alten, empfindlichen, mikrobiellen Lebensgemeinschaften werden. Aber auch in anderen Ökosystemen der Erde besiedeln Biokrusten-bildende Organismen den Boden, sobald freie Stellen durch zum Beispiel Baumfall, Feuer oder Vulkanausbrüche entstanden sind. Binnen kürzester Zeit können sich hier erste Formen einer Biokruste entwickeln, die Wasser, Staub und Nährstoffe binden, aber auch Temperatur- und Oberflächenstabilität des Bodens gewährleisten. Ihr Auftreten dient damit dem Erosionsschutz, da es Samen höherer Pflanzen zu keimen erlaubt und Nährstoffe für diese und Kleinstlebewesen bereithält.

### Ungeklärte Fragen

Betrachtet man die Vielfalt der Mikroorganismen, die trotz der unwirtlichen Bedingungen in der Atacama lebt, so muss man feststellen, dass die Forschung hier erst am Anfang steht. Eine besonders interessante Frage ist auch die, wodurch das schwarz-weiße Muster der „grit crust“ in der Landschaft entsteht. Möglicherweise sind hier topographische Effekte beteiligt, wie etwa Senken, in denen der Nebel länger verbleibt und damit an diesen Stellen mehr Wasser ins System einbringt. Dieses könnte zur Ansied-

lung der bisher nur spärlich erforschten Mikroorganismen führen, die an der „grit crust“ beteiligt sind. Auch Interaktionen zwischen einzelnen Organismengruppen wie etwa bestimmter Pilze können nicht ausgeschlossen werden. Einige könnten durch ihr parasitisches Verhalten die „grit crust“ möglicherweise verdrängen und andernorts neu aufkeimen lassen. Das von der DFG geförderte Forschungsprojekt ‚Grit Life‘ von Dr. Patrick Jung soll diesen Effekt nun klären und in den nächsten Jahren zu neuen Erkenntnissen führen.

### Zusammenfassung

*Der Nationalpark „Pan de Azúcar“ ist eine Nebeloase in der südlichen Atacama-Wüste Chiles. Er beherbergt eine Vielfalt an Cyanobakterien und Grünalgen, die insbesondere in Flechten vorkommen. Diversitätsaufnahmen und ökophysiologische sowie biochemische Untersuchungen zeigten, dass diese Lebewesen hervorragend an das Extremklima angepasst sind und schon bei geringsten Wassermengen aktiv werden können. Durch physikalische und chemische Veränderung ihrer Umwelt tragen sie damit zur Verwitterung von Gestein und Bodenbildung bei und sind an der Formung der Landschaft beteiligt.*

### Summary

#### *The Green Desert of South America?*

*“Pan de Azúcar National Park” is a fog oasis in the southern Atacama Desert of Chile. It hosts a diversity of cyanobacteria and green algae, which can especially be found in lichens. Diversity surveys and eco-physiological and biochemical studies have shown that these organisms are excellently adapted to the extreme climate and can already become active even if the amount of water available is very low. By changing their environment physically and chemically, they contribute to the weathering of rocks and soil formation and are thus involved in shaping the landscape.*

### Schlagworte:

Atacama, biologische Bodenkruste, Nebel, Verwitterung

### Danksagung:

Die Autoren danken der DFG für die Finanzierung der Forschungsprojekte im Rahmen von CRUSTWEATHERING (BE1780/44-1, BU666/19-1, KA899/32-1, LE903/14-1) im Schwerpunktprogramm 1803 “EarthShape: Earth Surface Shaping by Biota” sowie der chilenischen Forstbehörde (CONAF) für die Unterstützung im Feld. PJ dankt dem DFG Projekt „Grit Life“ (JU 3228/1-1) und EFRE (84003265).

### Literatur

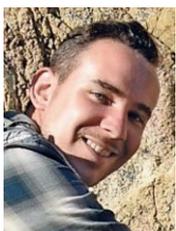
- [1] P. W. Rundel et al. (2007). Physical Geography of South America. In T.T. Veblen, K.R. Young, A.R. Orme (Eds.), Arid and semi-arid ecosystems. Oxford, UK: Oxford University Press, 158–183.
- [2] P. Jung et al. (2020). Desert breath – How fog promotes a novel type of soil biocenosis, forming the coastal Atacama Desert’s living skin. *Geobiology* 18, 113–124.
- [3] J. Bahl et al. (2011). Ancient origins determine global biogeography of hot and cold desert cyanobacteria. *Nature Communications* 2:163.

- [4] G. H. Schwabe (1960). Zur autotrophen Vegetation in ariden Böden. *Blaualgen und Lebensraum IV. Österreichische Botanische Zeitschrift* 107, 281–309.
- [5] P. Jung et al. (2021). Emendation of the coccooid cyanobacterial genus *Gloeocapsopsis* and description of the new species *G. diffluens* sp. nov. and *G. dulcis* sp. nov. isolated from the Coastal Range of the Atacama Desert (Chile). *Frontiers in Microbiology*, <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.671742>
- [6] P. Jung et al. (2019). Ecophysiology and phylogeny of new terricolous and epiphytic chlorolichens in a fog oasis of the Atacama Desert. *MicrobiologyOpen* 8, e894.
- [7] L. W. Lehnert et al. (2018). A case study on fog/low stratus occurrence at Las Lomitas, Atacama Desert (Chile) as a water source for biological soil crusts. *Aerosol and Air Quality Research* 18, 254–269.
- [8] T. Fischer et al. (2013). Hydraulic properties of biological soil crusts on sand dunes studied by <sup>13</sup>C-CP/MAS-NMR: A comparison between an arid and a temperate site. *Catena*, 155–160.
- [9] A. Azua-Bustos et al. (2019). Aeolian transport of viable microbial life across the Atacama Desert, Chile: implications for Mars. *Scientific Reports* 9, 11024.
- [10] P. Jung et al. (2020). Lichens bite the dust – a bioweathering scenario in the Atacama Desert. *iScience* 23, 101647.
- [11] B. Büdel et al. (2004). Reshaping of sandstone surfaces by cryptoendolithic cyanobacteria: bioalkalization causes chemical weathering in arid landscapes. *Geobiology* 2, 261–268.
- [12] J. F. Banfield et al. (1999). Biological impact on mineral dissolution: application of the lichen model to understanding mineral weathering in the rhizosphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 96, 3404–3411.

### Verfasst von:



*Karen Baumann, geb. 1974, Biologiestudium an der Universität Hamburg, Promotion 2005 an der BTU Cottbus, Postdoc an der University of Adelaide (Australien) und am CNRS (BioEMCo, Frankreich). Seit 2014 wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Bodenkunde der Universität Rostock.*



*Patrick Jung, geb. 1990, Bachelor in Biowissenschaften (2014), Master in Ökologie und mikrobieller Biodiversität (2016), Promotion 2019 an der TU Kaiserslautern. Aktuell wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Hochschule Kaiserslautern und zukünftiger Bearbeiter des DFG geförderten ‚Grit Life‘-Projekts.*



*Lukas W. Lehnert, geb. 1985, Studium der Geographie und Biologie an der Philipps-Universität Marburg, dort Promotion in Geographie 2015. Seit 2019 Professor für Physische Geographie und Umweltfernerkundung an der Ludwig-Maximilians-Universität München.*



*Elena Samolov, geb. 1984, Studium der Ökologie und Umweltwissenschaften (BSc, MSc) an der Universität Belgrad, Serbien. Zweiter Master in Umweltingenieurwesen an der Universität Belgrad, Serbien. Seit 2016 Doktorandin in der Abteilung Angewandte Ökologie und Phykologie der Universität Rostock mit einem Thema zur Biodiversität und Ökophysiologie von Grünalgen aus Bodenkrusten in Chile.*



*Christel Baum, geb. 1968, Studium der Pflanzenzüchtung und Saatgutproduktion an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberge, Promotion in Bodenkunde 1995, Habilitation 2004, seit 2020 apl. Professorin für Bodenbiologie an der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät der Universität Rostock. Spezialgebiete: Boden-Pflanze-Interaktionen, Bodenmikrobiologie.*



*Jörg Bendix, geb. 1961, Studium der Geographie in Trier und Bonn, Promotion 1992, Habilitation 1998, seit 2000 Professor für Geoökologie an der Philipps-Universität Marburg. Spezialgebiete: Klimatologie, Klimaökologie und Fernerkundung.*



*Ulf Karsten, geb. 1960, Studium der Biologie in Bremen, Promotion 1990, Habilitation 1998, seit 2000 Professor für Angewandte Ökologie und Phykologie am Institut für Biowissenschaften der Universität Rostock. Spezialgebiet: Ökophysiologie und Biochemie von Algen extremer Lebensräume.*



*Burkhard Büdel, geb. 1953, Chemie- und Biologiestudium an der TU Darmstadt und Philipps-Universität Marburg, an letzterer auch Promotion (1986). Postdoc Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Habilitation (1993). Danach Heisenberg-Stipendiat (DFG), TU Darmstadt und Forschungsinstitut Senckenberg, Außenstelle Lochmühle (1994–1995). Professur an der Universität Rostock (1995–1997). Zuletzt Professur für Pflanzenökologie und Systematik an der TU Kaiserslautern (1997–2019). Seit dem 1. April 2019 im Ruhestand.*



*Peter Leinweber, geb. 1959, Studium der Pflanzenproduktion an der Universität Rostock, Promotion in Bodenkunde 1988, Habilitation 1995, seit 1998 Professor für Bodenkunde an der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät der Universität Rostock. Spezialgebiete: Organische Bodensubstanzen, Phosphor im System Boden – Pflanze – Gewässer.*

### Korrespondenz

*Dr. Karen Baumann  
Universität Rostock, Agrar- und  
Umweltwissenschaftliche Fakultät  
Bodenkunde  
Justus-von-Liebig-Weg 6  
18051 Rostock  
E-Mail: karen.baumann@uni-rostock.de*

*Dr. Patrick Jung  
Hochschule Kaiserslautern  
Angewandte Logistik- und Polymerwissenschaften  
Carl-Schurz-Str. 10–16  
66953 Pirmasens  
[www.selectedplants.de](http://www.selectedplants.de)  
E-Mail: patrick\_jung90@web.de*

ABB. 1 Ein Wanderheuschreckenschwarm im Isalo Nationalpark (Madagaskar) am 15. April 2013. Foto: Tiphaine Desjardin (FAO).

# Wie harmlose Insekten zu gefährlichen Schwärmen werden 100 Jahre Forschung an Wanderheuschrecken

HANS-JOACHIM PFLÜGER | PETER BRÄUNIG

In regelmäßigen Abständen erhalten wir Berichte, dass in Afrika, der arabischen Halbinsel, in vielen Teilen Asiens, aber auch in Südamerika, Schwärme von Wanderheuschrecken auftauchen, die verheerende Auswirkungen auf das Leben von Millionen von Menschen haben, weil sie deren Nahrungsgrundlagen zerstören und Hungersnöte zur Folge haben. Ein solcher Schwarm kann aus mehreren hundert Millionen Heuschrecken bestehen und sich über ein Areal von mehr als 1000 Quadratkilometern erstrecken (Abbildung 1). Bereits in der Bibel (Buch Exodus) werden solche „Plagen“ beschrieben und nach wie vor leidet die Menschheit unter ihnen. Warum? Schwärme adulter Wanderheuschrecken können letztendlich nur durch den massiven Einsatz von Insektiziden bekämpft werden, die über weite Landstriche versprüht werden. Dies hat gravierende Auswirkungen auf die betroffenen Ökosysteme und die sowieso schon fragile Landwirtschaft. Daher ist die Erforschung der Bedingungen, unter denen sich solche Schwärme überhaupt bilden, ein wichtiger Beitrag der Wissenschaft zur Verbesserung der Lebensgrundlagen von Millionen von Menschen.

Vor ziemlich genau 100 Jahren – im Jahr 1921 – erschien im *Bulletin of Entomological Research* die Arbeit eines jungen russischen Insektenforschers, Boris Petrovitch Uvarov, der seine experimentellen Arbeiten von 1911 bis 1914 im Kaukasus noch vor Beginn des Ersten Weltkriegs durchgeführt hatte, seine Ergebnisse aber erst veröffentlichen konnte, als er nach England übersiedelt war und eine Stelle als Assistenz-Entomologe am *Imperial Bureau of Entomology* in London angetreten hatte. Es war ein sehr erfolgreicher Umzug, denn später wurde er zum Leiter des *Anti-Locust Research Centers* ernannt, dem er von 1945 bis 1964 vorstand. Aus dem, wie man heute sagen würde, Postdoktoranden wurde einer der weltweit angesehensten Entomologen, der schließlich auch von Königin Elisabeth II. geadelt wurde (Sir Boris P. Uvarov, Abbildung 2). Was war nun die bahnbrechende Entdeckung, die ihm mit experimenteller Hilfe seines Freundes und Kollegen V. Plotnikov gelang? Die Veröffentlichung handelt von einer Neubeschreibung der Gattung *Locusta* (Wanderheuschrecken) mit einer neuen Theorie zum periodischen Vorkommen und zur Wanderung von Wanderheuschrecken [1].

Im Kaukasus traten regelmäßig Schwärme von Heuschrecken der Art *Locusta migratoria* auf und außerdem eine andere Art, *Locusta danica*. Diese war von ähnlicher Gestalt, aber etwas anders gefärbt, lebte eher versteckt und zeigte in vielerlei Hinsicht das gegenteilige Verhalten zu den Schwarmtieren. Allerdings ergaben die Feldunter-

suchungen den zunächst seltsamen Befund, dass aus Eiern der einen Art Hüpfer schlüpften, die eher der anderen Art glichen oder umgekehrt. Auffallend war auch, dass sich die Genitalien der Männchen beider Arten kaum unterschieden, obwohl bei Insekten die Geschlechtsorgane der Männchen häufig ein eindeutiges Artbestimmungsmerkmal darstellen, da weibliche und männliche Genitalien nach einem „Schloss-Schlüssel-Prinzip“ funktionieren. Viele weitere Felduntersuchungen haben Boris Uvarov dann überzeugt, dass *Locusta danica* und *Locusta migratoria* gar keine verschiedenen Arten sind, sondern nur zwei Erscheinungsformen ein und derselben Heuschreckenart, nämlich von *Locusta migratoria*. Wanderheuschrecken können also als sogenannte solitäre Individuen in geringer Dichte pro Areal vorkommen oder in extremer Populationsdichte in Schwärmen, als sogenannte gregäre Tiere.

Heute wird dieses Phänomen Polyphänismus genannt, worunter man versteht, dass aus einem Genotyp, also einer Art mit bestimmter genetischer Ausstattung, unterschiedliche Erscheinungsformen entstehen können [2]. Aufgabe der biologischen Wissenschaft war und ist es, die Bedingungen zu verstehen, unter denen aus harmlosen, solitären Individuen eines Gebiets plötzlich große Gruppen entstehen, die sich zu riesigen Schwärmen vereinen können. Von den knapp 7000 Arten von Feldheuschrecken sind es weltweit allerdings nur etwa 20 Arten, welche die Fähigkeit besitzen, Schwärme zu bilden. Heute ist bereits klar, dass bei dem Prozess der Umwandlung von solitären zu gregären Tieren viele Faktoren eine Rolle spielen, und diese sind bei allen 20 Arten in jedem Einzelfall anders gewichtet.

### Ursachen für den Polyphänismus

Am besten untersucht sind die Wüstenwanderheuschrecke (*Schistocerca gregaria*, Abbildung 3) und die Afrikanische Wanderheuschrecke (*Locusta migratoria*). Beginnen wir mit den Abläufen bei frisch aus den Eiern geschlüpften Nymphen, auch Hüpfer (engl. „hoppers“) genannt. Einer der entscheidenden Faktoren ist, dass sich diese Hüpfer in größerer Anzahl treffen und bei knapp werdender Nahrung sogenannte „marching hopper bands“, also Marschformationen bilden. Verursacht werden kann das durch schwindende Vegetation, wodurch sich einzelne Hüpfer dann auf ihrer Nahrungssuche begegnen und sich in verbliebenen Vegetationsinseln versammeln, oder dadurch dass durch plötzliche Regenfälle in sonst eigentlich trockenen Wüstengebieten eine Vielzahl von Hüpfern aus Gelehen überlebt haben und sich ihre Population auf diese Weise verdichtet. Solche Ansammlungen von Hüpfern führen dann dazu, dass alle weiteren Entwicklungsprozesse synchronisiert werden, also alle Häutungen bis zum adulten Insekt, die Paarung und Eiablage, und auch das gesamte Verhalten der Tiere. Ein Gelehe kann aus bis zu 70 Eiern bestehen, und durch die Synchronisation des Schlüpfens der Nymphen aus diesen Eiern entstehen immer größere Gruppierungen von Heuschrecken (Abbildung 4).



**ABB. 2** Sir Boris P. Uvarov, der als erster erkannte, dass eine Wanderheuschreckenart aus zwei Phasen besteht, einer solitären und einer gregären. Foto abgedruckt mit Erlaubnis der National Portrait Gallery.

Welche Prozesse sind nun am Übergang eines Individuums vom solitären zum gregären Stadium beteiligt? Für eine lange Zeit bestand die Vorstellung, dass chemische Lockstoffe, sogenannte Aggregationspheromone, eine große Rolle spielen. Mittlerweile ist bekannt, dass Heuschrecken

### IN KÜRZE

- Wanderheuschrecken kommen in einer solitären und einer gregären Phase vor. In der gregären Phase können sich die Insekten zu **riesigen Schwärmen vereinen**, die dann zur Plage in den betroffenen Gebieten werden.
- Solitäre Tiere unterscheiden sich sehr deutlich von gregären Tieren. Vor genau 100 Jahren, 1921, erkannte Boris Uvarov als erster, dass es sich bei diesen Erscheinungsformen nicht um unterschiedliche Arten, sondern um **unterschiedliche Phasen ein und derselben Art** handelt.
- Seither wurden viele Versuche unternommen, die **Ursachen für diesen Phasen-Polymorphismus** aufzuklären. Dies geschah auch, um Methoden zu entwickeln, die Schwarmbildung zu verhindern.
- Das Zusammenspiel der vielen Faktoren, die bei diesem Prozess eine Rolle spielen, ist auch 100 Jahre nach Uvarovs Entdeckung immer **noch nicht wirklich** verstanden.
- Angesichts der Probleme, die diese Tiere in vielen Teilen der Welt verursachen, sollte der **Erforschung der Grundlagen für die Umwandlung** harmloser solitärer Tiere in gefräßige Schadinsekten hohe Priorität eingeräumt werden.



**ABB. 3** Nymphen (links) und adulte Tiere (rechts) von gregären (a, b) und solitären (c, d) Wüstenwanderheuschrecken (*Schistocerca gregaria*). Fotos aus [11] mit freundlicher Genehmigung der Company of Biologists Ltd.

in komplizierter Weise chemisch miteinander kommunizieren und jede Heuschreckenart, jedes Stadium und jedes Alter ein spezifisches Bouquet von Geruchsstoffen besitzt, die entweder anziehend oder abstoßend wirken [3, 4]. Erst kürzlich ist bei einer Art ein Stoff isoliert worden, der auf gregäre Individuen anziehend wirkt und auf solitäre abstoßend [5]. Andere Stoffe wirken auf die Vermehrung, die Eiablage in Gruppen oder die Synchronisation des Verhaltens (Kasten „Chemische Substanzen“).

In einer Gruppe von Hüpfern kommt es zu vielfältigen Sinnesreizen, und wie sich herausgestellt hat, sind mechanische Berührungsreize am wichtigsten, erst danach folgen Geruchsreize und visuelle Reize [6]. Diese Sinnesreize führen nun im Nerven- und Hormonsystem der Insekten zu vielfältigen Veränderungen, die das gesamte Verhalten

eines Individuums betreffen. Eine entscheidende Rolle spielen biogene Amine wie z.B. Serotonin. Ein erhöhter Serotoningehalt führt zu gregärem Verhalten, was sich in Wahlversuchen in einer Arena sehr gut nachweisen lässt [7]. Normalerweise meiden solitäre Heuschrecken die Ansammlung von anderen Individuen, ganz im Gegenteil zu gregären Heuschrecken, welche sofort die Gesellschaft der anderen suchen. Wird einer solitären Heuschrecke Serotonin verabreicht, so verhält sie sich plötzlich wie ein Schwarmindividuum und sucht die Gesellschaft der anderen. Auch andere biogene Amine wie Dopamin oder Octopamin spielen bei diesen Prozessen eine Rolle. All diese Einflüsse führen dazu, dass sich Einzelindividuen und Individuen eines Schwarms sehr stark voneinander unterscheiden: So sind solitäre Individuen tagsüber scheu, verstecken sich, bewegen sich wenig und sind gegenüber ihrer Umgebung gut getarnt. Wenn sie fliegen, um Ortswechsel zu vollziehen, dann bei Nacht. Schwarmtiere dagegen sind durch „Warnfarben“ sehr auffällig, sind tagsüber sehr aktiv und ruhen bei Nacht, oft auf den höchsten Büschen oder Bäumen (Abbildung 5). Die großen Schwärme der Heuschrecken sind also immer nur am Tag unterwegs [8–10].

### Welche Rolle spielen Gene und epigenetische Einflüsse?

Ein neuer Forschungszugang beschäftigt sich mit genetischen Kontrollmechanismen und der Frage, welche Unterschiede es hier zwischen solitären und gregären Individuen gibt. Erschwert werden solche Untersuchungen durch die Tatsache, dass das Genom der Heuschrecken mit über  $8 \times 10^9$  Basenpaaren zu den größten Genomen überhaupt zählt (das Genom des Menschen besteht im Vergleich dazu aus etwas mehr als  $3 \times 10^9$  Basenpaaren). Die Zahl der Gene ist zudem artspezifisch, und Wanderheuschrecken haben wohl um die 18.000 Gene (beim Menschen schwanken die Angaben, aber es sind sicher

## CHEMISCHE SUBSTANZEN

**Geruchsbouquet adulter Wüstenheuschrecken (*Schistocerca gregaria*):**

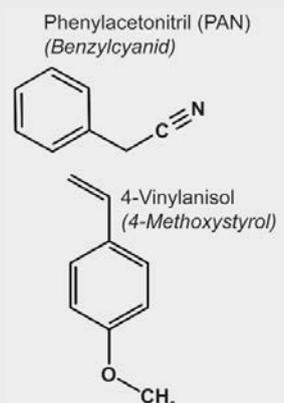
**Aldehyde:** Hexanal, Octanal, Nonanal, Decanal, **Carbonsäuren:** Valeriansäure (Pentansäure), Capronsäure (Hexansäure), Caprylsäure (Octansäure), Pelargonsäure (Nonansäure), Caprinsäure (Decansäure)

**Aus Kot von Nymphen der Wüstenheuschrecke (*Schistocerca gregaria*):** Guajacol, Phenol  
**Adulte solitäre Männchen der Wüstenheuschrecke (*Schistocerca gregaria*):** Benzaldehyd, Veratrol, Anisol, Guajacol

**Adulte gregäre Männchen der Wüstenheuschrecke (*Schistocerca gregaria*):**

Hauptbestandteil: **Phenylacetonitril** (Benzylcyanid), freigesetzt aus den Hinterbeinen und der Flügelbasis, sehr wahrscheinlich ein Hemmpheromon, um andere Männchen von einem Weibchen fern zu halten und um bei der Masseneiablage den Abstand zum nächsten Paar zu regeln [4]

**Kürzlich als Aggregationspheromon bei Wanderheuschrecken (*Locusta migratoria*) identifiziert: 4-Vinylanisol** (4-Methoxystyrol), wirkt anziehend auf Nymphen und Adulte von solitären und gregären Individuen [5]

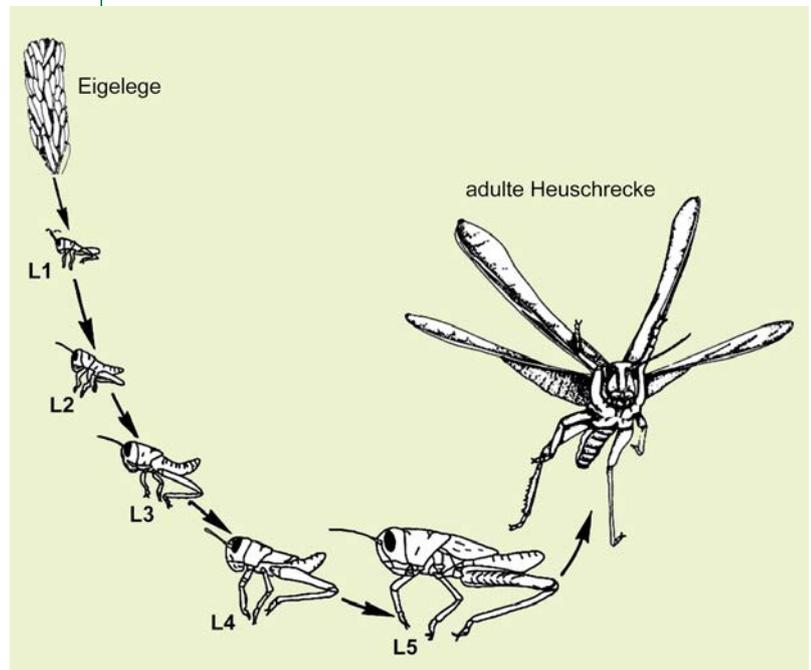


mehr als 20.000). Neueren Ergebnissen zufolge zeigen mehr als 200 Gene ein verändertes Expressionsmuster zwischen solitären und gregären Wanderheuschrecken. Dies unterstreicht, dass die Veränderungen zwischen solitären und gregären Tieren viele Bereiche des Organismus betreffen, und dass dieser Wandel aus vielen ineinandergreifenden Prozessen besteht [11, 12].

### Bekämpfung von Schwärmen

Wie könnten nun weitere Ausbrüche von Heuschreckenschwärmen verhindert werden? „Wehret den Anfängen“ wäre die geeignete Devise, denn die gezielte Bekämpfung von lokal auftretenden Ansammlungen von Hüpfern („marching hopper bands“) könnte das Auftreten großer Schwärme möglicherweise ganz verhindern oder zumindest die Zahl der Individuen in einem Schwarm vermindern. Das setzt aber voraus, dass es in den betroffenen Gebieten lokale Naturbeobachter (eine Art Heuschreckenwacht) gibt, die letztlich auch Gebiete überwachen müssen, die dünn besiedelt oder gar unbewohnt sind. Solche unbewohnten Gebiete werden durch Satellitenbeobachtungen der FAO (Food and Agriculture Organization der Vereinten Nationen) bereits jetzt überwacht, um z. B. die Vegetationsdichte oder die Areale mit Regenfällen auszuweisen. Allerdings lässt sich das Auftreten einer vermehrten Zahl von Hüpfern noch nicht durch Satellitenüberwachung feststellen, so dass nichts den Augenschein durch

ABB. 4 | LEBENSZYKLUS EINER WANDERHEUSCHRECKE



Aus einem Eigelege mit 50–70 Eiern schlüpfen die ersten Nymphen, die bereits wie „kleine erwachsene“ Heuschrecken aussehen. Die Wanderheuschrecken gehören deshalb zu den hemimetabolen Insekten. In den verschiedenen Häutungen werden die Flügelanlagen immer größer, bis dann aus der letzten Häutung das erwachsene Insekt mit voll ausgebildeten Flügeln hervorgeht.

### SCHULVERSUCH

Die Umwandlung der gregären in die solitäre Form ist mit recht einfachen Mitteln auch im Rahmen von Labor- oder Schulversuchen zu beobachten. Wichtig dabei ist es, die Versuche in einem möglichst großen, gut durchlüfteten Raum durchzuführen, da Heuschrecken wie alle Insekten allergene Partikel absondern können. Die beiden für die Versuche verwendeten Arten von Wanderheuschrecken *Locusta migratoria* und *Schistocerca gregaria* werden im Zoohandel als Lebendfutter für Reptilien angeboten. Die Tiere können mit Gräsern gefüttert werden, die dort gesammelt werden, wo die Gefahr der Belastung mit Insektiziden ausgeschlossen ist. Die Tiere sind wärmeliebend. Ein kleiner Käfig oder ein Terrarium, in dem den Tieren eine Glühbirne als Wärmequelle dient, genügt für die Haltung. Ein mit grobem, feuchtem Sand gefüllter Blumentopf dient den Tieren als Eiablageplatz. Der Sand sollte regelmäßig befeuchtet und ausgetrocknetes Futter durch frisches ersetzt werden. Wenn die Weibchen Eier abgelegt haben, dauert es bei Zimmertemperatur in der Regel 3–4 Wochen bis die ersten Nymphen (Hüpfer) schlüpfen.

Nach dem Schlüpfen sollten die Tiere voneinander isoliert werden. Sie können einzeln z. B. in Gläsern oder Plastikdosen mit einem Volumen von um die 400 ml gehalten werden. Die Gläser sollten mit Gaze abgedeckt werden. Löcher im Deckel reichen oft nicht aus, um die durch das Futter eingebrachte Feuchtigkeit zu regulieren, was zu Pilzkrankungen führen kann. Die Gläser sollten an einem hellen warmen Ort im Abstand von ca. 1 m aufgestellt werden. In jedes Glas sollte ein Ästchen gestellt werden, an dem sich die Tiere für die Häutung aufhängen können. Nun geht die Arbeit los, denn je nachdem wie viele Nymphen man hält, dauert das tägliche Füttern eine Weile. Bei guter Fütterung häuten sich die Tiere in Abständen von einer Woche oder länger (je nach Alter). Im Laufe ihrer Entwicklung nehmen die Tiere nun eine graubraune bis laubfroschgrüne Färbung an, die sich erheblich von der gregären Phase unterscheidet (schwarzbraune Nymphen bei *Locusta migratoria*, gelbschwarze Nymphen mit roten Augen bei *Schistocerca gregaria*). Auch ihr Verhalten ist vergleichsweise „lethargisch“.



Ein einfacher Zucht käfig für Heuschrecken. In einem kleinen Terrarium wurde eine der Schiebetüren durch eine passende Plexiglasplatte mit einer Fassung für eine 40 W Glühbirne ersetzt.



**ABB. 5** Ein Schwarm von Wüstenheuschrecken, der auf einem Baum in Somaliland die Nacht verbracht hat. Foto am 22. Februar 2021 aufgenommen und mit freundlicher Erlaubnis von FAO Somalia abgedruckt.

lokale Fachleute ersetzen kann. Neuere Erkenntnisse über arteigene Duftstoffe (Pheromone), die zur Aggregation der Hüpfer führen, ermöglichen vielleicht auch die Entwicklung von wirksamen Fallen. Auch hier kann weitere intensive Forschung wertvolle Erkenntnisse leisten [14].

Leider sind die politischen Verhältnisse in den betroffenen Gebieten der Welt alles andere als stabil. Durch Bürgerkriege oder Aufstände gibt es oft gar keine funktionierenden Verwaltungsstrukturen mehr, was bei den letzten großen Ausbrüchen am Horn von Afrika sicher als ein Faktor mitspielte. Ein weiterer Faktor ist der spürbare Klimawandel, dadurch bedingte Veränderungen in der Großwetterlage und damit verbundene ökologische Veränderungen. Was also vor 100 Jahren mit den Studien an Wanderheuschrecken von Boris Petrovitch Uvarov begann, wird zukünftige Forscher- und Menschengenerationen weiterhin beschäftigen. Es bleibt zu hoffen, dass nicht nur Biologen das Zusammenspiel verschiedener Prozesse besser verstehen lernen, sondern auch Fachleute aus der Landwirtschaft sowie alle verantwortlichen Politiker die Entwicklung aufmerksam beobachten und entsprechend handeln werden.

### Zusammenfassung

*Feldstudien vor 100 Jahren haben ergeben, dass verschiedene Wanderheuschreckenarten in zwei Phasen vorkommen, die davor als getrennte Arten betrachtet worden waren. Als solitäre Tiere (Einzeltiere) leben sie in geringer Dichte in ihrem spezifischen Ökosystem. Unter bestimmten klimatischen Bedingungen (Dürren oder Regen) kommt es zur*

*Verdichtung der Tiere, was eine ganze Reihe unterschiedlicher Veränderungen bewirkt und solitäre Tiere zu gregären Schwarmtieren werden lässt. Berührungen der Tiere untereinander führen zu physiologischen Veränderungen im Organismus. Beeinflusst werden Bildung und Wirkung biogener Amine, von Hormonen und Pheromonen, und es kommt zu einer Vielzahl epigenetischer und genetischer Veränderungen. Zunächst führen alle diese Faktoren zu Verhaltensänderungen der Insekten, später zu Änderungen in ihrem Erscheinungsbild (z. B. Färbung) und zu morphologischen Veränderungen. Das Zusammenspiel aller beteiligten Faktoren ist aber noch nicht völlig verstanden.*

### Summary

#### *How harmless insects transform into dangerous swarms: 100 years of research on locusts*

*100 years ago, field studies showed for the first time that certain migratory locusts exist in two different phases, previously believed to be different species. At low density, they live solitary in their specific ecosystem. Under certain climatic conditions (strong rainfalls, but also droughts and diminishing food supply) the population densities may rise. This causes a number of changes and solitary animals transform into gregarious swarms. Due to overcrowding, contacts between the insects increase in number thus bringing about physiological changes in their organisms: The production and the effect of biogenic amines, hormones and pheromones are influenced; in addition, numerous genetic and epigenetic processes are induced. First of all, all these factors cause changes in insect behaviour, followed by changes in their appearance (e. g. colouration) and finally morphological modifications. The exact interaction between these different factors is not yet fully understood.*

### Schlagworte

Insekten, Wanderheuschrecken, Polyphänismus, Schädlingsbekämpfung, Phasen-Polymorphismus.

### Literatur

- [1] B. P. Uvarov (1921). A revision of the genus locusts L (= PACHYTILUS, FIEB) with a new theory as to the periodicity and migrations of locusts. *Bull Entomol Res* 12(2), 135–163.
- [2] M. P. Pener, S. J. Simpson (2009). Locust phase polyphenism: an update. *Adv Insect Physiol* 36, 1–289.
- [3] P. G. N. Njagi et al. (1996). Phase-independent responses to phase-specific aggregation pheromone in adult desert locust, *Schistocerca gregaria* (Forsk.) (Orthoptera: Acrididae). *Physiol Entomol* 21, 131–137.
- [4] K. Seidelmann, H. M. Ferenz (2002). Courtship inhibition pheromone in desert locusts, *Schistocerca gregaria*. *J Insect Physiol* 48, 991–996.
- [5] X. Guo et al. (2020). 4-Vinylanisole is an aggregation pheromone in locusts. *Nature* 584, 584–588.
- [6] S. M. Rogers et al. (2003). Mechanosensory-induced behavioural gregarization in the desert locust *Schistocerca gregaria*. *J Exp Biol* 206, 3991–4002.
- [7] M. L. Anstey et al. (2009). Serotonin mediates behavioral gregarization underlying swarm formation in desert locusts. *Science* 323, 627–630.

- [8] D. A. Cullen et al. (2017). From molecules to management: mechanisms and consequences of locust phase polyphenism. *Adv Insect Physiol* 53, 187–265.
- [9] X. Wang, L. Kang (2014). Molecular mechanisms of phase changes in locusts. *Annu Rev Entomol* 59, 225–244.
- [10] A. De Loof et al. (2006). Molecular markers of phase transition in locusts. *Insect Sci* 13, 3–12.
- [11] U. R. Ernst et al. (2015) Epigenetics and locust life phase transitions. *J Exp Biol* 218, 88–99.
- [12] H. Verlinden et al. (2020) First draft genome assembly of the desert locust, *Schistocerca gregaria*. *F1000Res* 9, 775.
- [13] X. Wang et al. (2014). The locust genome provides insight into swarm formation and long-distance flight. *Nat Commun* 5, 2957.
- [14] C. N. Meynard et al. (2020). On the relative role of climate change and management in the current desert locust outbreak in East Africa. *Glob Change Biol* 26, 3753–3755.



Peter Bräunig studierte Biologie an der Universität Konstanz und promovierte dort 1983 über Mechanorezeptoren in den Beingelenken von Insekten. Von 1983 bis 1998 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU München und habilitierte dort 1991 im Fach Zoologie. Von 1992 bis 1995 Forschung als Heisenbergstipendiat mit einjährigem Aufenthalt an der Harvard Medical School. Von 1998 bis 2017 Universitätsprofessor für Entwicklungsbiologie und Morphologie der Tiere an der RWTH Aachen.

**Korrespondenz:**

Hans-Joachim Pflüger  
 Freie Universität  
 Institut für Biologie  
 Neurobiologie  
 Königin-Luise-Straße 1–3  
 14195 Berlin  
 E-Mail: pflueger@neurobiologie.fu-berlin.de

Peter Bräunig  
 Institut Biologie II  
 RWTH Aachen  
 Worringerweg 3  
 52074 Aachen  
 E-Mail: braeunig@bio2.rwth-aachen.de

**Verfasst von:**



Hans-Joachim Pflüger studierte Biologie und Chemie an der Universität Stuttgart und promovierte an der Universität Kaiserslautern. Von 1976 bis 1977 war er mit einem DFG-Stipendium an der University of Cambridge, UK. Von 1977 bis 1980 war er Hochschulassistent an der Universität Bielefeld und von 1980 bis 1987 an der Universität Konstanz, wo er sich 1985 im Fach Zoologie habilitierte. Von 1987 bis 2017 war er Universitätsprofessor für Funktionelle Neuroanatomie/ Neurobiologie an der Freien Universität Berlin. Forschungsaufenthalte führten ihn nach Tucson und Tempe, Arizona (USA), Christchurch (Neuseeland) und Sapporo (Japan).

**AUS DER FORSCHUNG IN DIE SCHULE**

Das neu gestaltete Portal [www.max-wissen.de](http://www.max-wissen.de) der Max-Planck-Gesellschaft bietet verschiedene kostenfreie Medien und aktuelle Informationen zu den Fächern Biologie, Chemie, Geographie und Physik. Dazu gehören Illustrationen, Bilder, Fotos, Audiodateien, Filme, Aufgaben und interaktive Übungen, die für die Erstellung von Unterrichtsmaterialien genutzt werden können. Die bewährten MAX-Hefte BIOMAX, GEOMAX und TECHMAX erklären Grundlagen und berichten über aktuelle Forschungsergebnisse der Max-Planck-Institute. Sie stehen als PDF-Dateien zum Download bereit und können als Printversion im Klassensatz kostenfrei bestellt werden. Außerdem werden auf dem Portal weitere interessante Angebote aus der Max-Planck-Welt vorgestellt: Besuche an Instituten, Vorträge von Forscherinnen und Forschern an Schulen, Citizen-Science-Projekte oder eine Fahrt ins Schülerlabor.



In der vom Schweizerischen Nationalfonds SFN geförderten «miwelt» erkunden Kinder ab 7 Jahren zusammen mit Forschern die «unsichtbare» Welt der Mikroorganismen (u. a. Hefen, Bakterien, Mikroalgen), ihr Vorkommen im Alltag sowie ihre Nutzung im Labor. Hierfür entwickeln die Fachleute aus Wissenschaft, Kunst und Journalismus illustrierte Sachgeschichten, thematische Exkursionen und Laborversuche zum Thema mikrobielle Biotechnologie. Außerdem werden Labortage angeboten

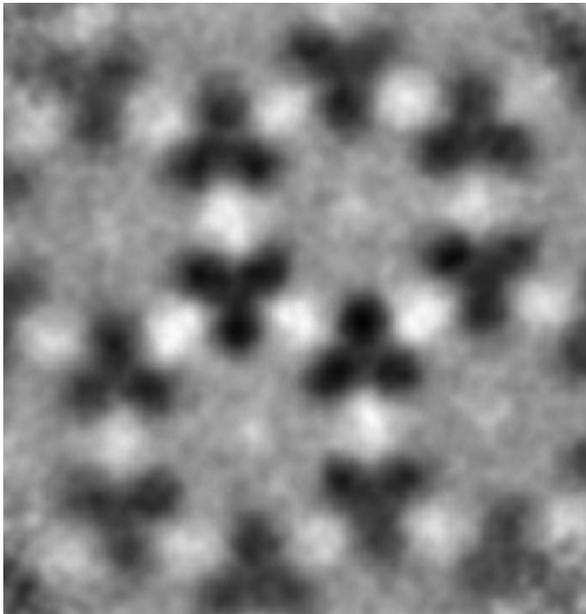
oder die miwelt-Experten kommen direkt in die Schule, um mit den Kindern zu experimentieren. Weitere Infos finden sich unter <https://miwelt.net>.

# Wie sich Bakterien in ihrer Umwelt zurechtfinden

## Bakterielle Sensorenkomplexe zur Umweltnavigation

ARIANE BRIEGEL

**Aufsicht auf ein Chemorezeptorgitter von *Escherichia coli* nach der Bildverarbeitung von kryoelektronentomographischen Aufnahmen.**



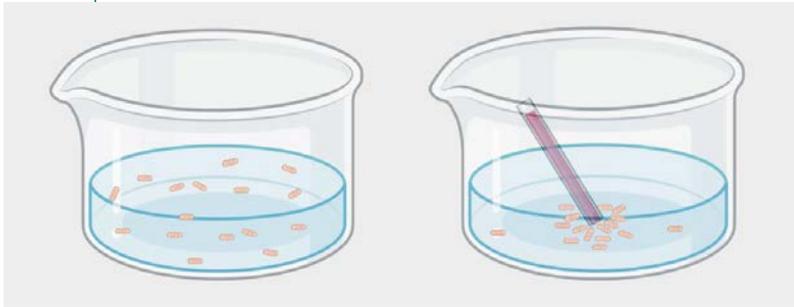
*Obwohl Bakterien mikroskopisch kleine, einzellige Lebewesen sind, können sie ihre Umgebung wahrnehmen und auf kleinste Veränderungen reagieren. Viele Arten sind sogar fähig, sich aktiv zu bewegen und bevorzugte Lebensräume aufzusuchen – entweder durch Schwimmen in flüssigem Medium oder durch Kriechen, Schwärmen oder Gleiten auf Oberflächen. Um optimal von ihrer Beweglichkeit zu profitieren, müssen die Bakterien in der Lage sein, Konzentrationsgradienten von Lock- und Schreckstoffen wahrzunehmen und ihre Bewegung dementsprechend zu kontrollieren. Dieses Verhalten wird Chemotaxis genannt und ist mittlerweile sehr gut untersucht.*

Die Grundlagen der bakteriellen Chemotaxisforschung liegen weit zurück: Der deutsche Wissenschaftler Wilhelm Pfeffer entwickelte den ersten Versuchsaufbau zur Untersuchung der Chemotaxis von Bakterien bereits im Jahr 1884. Dafür benutzte er Glaskapillaren, die er mit Lockstoffen (wie zum Beispiel Fleischextrakt) füllte und in eine Bakteriensuspension tauchte. Mithilfe eines Mikroskops konnte er dann beobachten, wie sich die Bakterien an der Öffnung der Kapillaren sammelten (Abbildung 1). Im Jahr 1966, rund achtzig Jahre nach Pfeffers Versuchen, publizierte Julius Adler einen Artikel in der Fachzeitschrift *Science* mit dem Titel „Chemotaxis in Bacteria“ [1]. In dieser Arbeit beschreibt er, dass das Bakterium *Escherichia coli* in der Gegenwart von Sauerstoff und den als Nährstoffe genutzten Verbindungen Galaktose, Glukose, Asparaginsäure, Threonin und Serin chemotaktisches Verhalten aufweist. Damit hat er bewiesen, dass Bakterien mithilfe von chemotaktischem Verhalten ener-

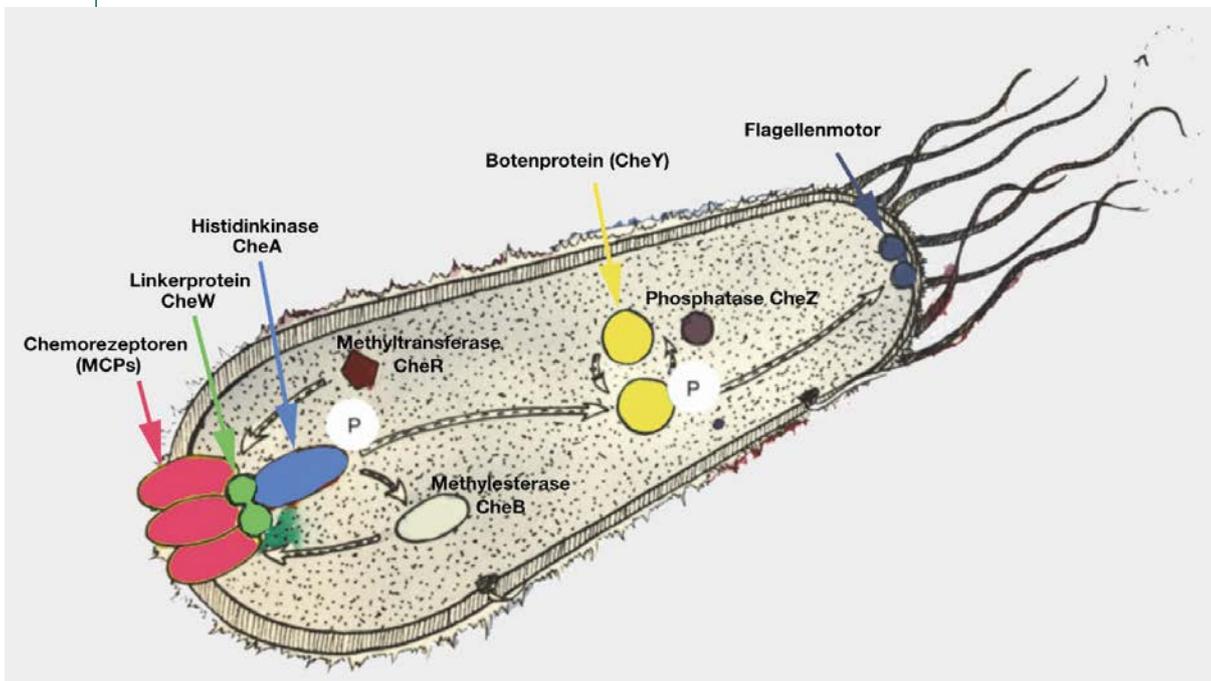
getisch optimale Lebensräume aufsuchen und ungünstige Umweltbedingungen vermeiden können.

### Chemotaxis im Modellorganismus *E. coli*

Wie sind einzellige Bakterien in der Lage, ihre Umwelt wahrzunehmen und daraufhin ihren Bewegungsapparat zu kontrollieren? Jahrzehntelange Forschung seit der Studie von Adler hat dazu geführt, dass Chemotaxis als das derzeit am besten verstandene Signaltransduktionssystem in der Biologie gilt. Die Wahrnehmung von Lock- und Schreckstoffen erfolgt durch die Bindung an Sensoren – die sogenannten Chemorezeptoren (*methyl-accepting chemotaxis proteins*, MCPs). In *E. coli* gibt es fünf Chemorezeptoren, die verschiedene Signale aus der Umwelt wahrnehmen können. Tausende dieser membrangebundenen Rezeptoren formen zusammen einen makromolekularen Komplex am Zellpol. An den cytoplasmatischen Enden der MCPs sind zwei weitere Proteine gebunden:

**ABB. 1 | WILHELM PFEFFER'S CHEMOTAXISVERSUCH**


Zu Beginn des Versuchs sind *Escherichia coli*-Bakterien (orange) gleichmäßig in einer Suspension verteilt (links). Nach Eintauchen einer mit Fleischsaft gefüllten Kapillare in die Bakteriensuspension (rechts) konnte der Forscher mithilfe eines Mikroskops beobachten, wie sich die Bakterien an der Kapillarenöffnung ansammeln. Abbildung mit BioRender erstellt.

**ABB. 2 | CHEMOTAXIS BEI *E. COLI***


Die Chemorezeptoren (MCPs, rot) bilden einen makromolekularen Komplex mit einem Linkerprotein (CheW, grün) und der Histidinkinase CheA (blau) am Zellpol. Lock- oder Schreckstoffe binden an die MCPs, die wiederum die Aktivität des Enzyms CheA kontrollieren. Im aktiven Zustand phosphoryliert CheA das Botenprotein CheY (gelb), das dann an die Flagellenmotoren bindet. Nach Dephosphorylierung von CheY durch die Phosphatase CheZ (lila) wird das Signal beendet. Die Enzyme CheR (eine Methyltransferase, braun) und CheB (eine Methylsterase, grau umrandet) kontrollieren den Methylierungszustand der Rezeptoren. Dies ermöglicht es den Zellen, die gegenwärtige Situation mit der Stoffkonzentration der Vergangenheit zu vergleichen. Abbildung: Ethan Fields.

das Enzym CheA, eine Histidinkinase, und das Linkerprotein CheW. Die MCPs kontrollieren die Aktivität des CheA-Enzyms. Wird CheA von den Rezeptoren aktiviert, überträgt das Enzym eine Phosphorylgruppe auf das Botenprotein CheY. Das phosphorylierte Botenprotein kontrolliert die Aktivität des Bewegungsapparates der Zelle. Die Phosphatase CheZ wiederum entfernt die Phosphorylgruppe von CheY und beendet die Signalübertragung (Abbildung 2).

*E. coli* ist ein stäbchenförmiges Bakterium und besitzt ca. 8–10 Flagellen, mit denen es in flüssigem Medium schwimmen kann. Jede Flagelle ist über einen Haken mit einem in der Zellhülle eingebetteten rotierenden Motor

### IN KÜRZE

- Bewegliche Bakterien sind in der Lage, sich durch chemotaktisches Verhalten in ihrer **Umwelt zurechtzufinden**.
- Chemotaxis ist eines der am besten untersuchten **Signaltransduktionssysteme** der Biologie
- Die Umweltsignale werden von **hochgeordneten Gittern aus Rezeptoren** wahrgenommen und über eine Signalkette an den Bewegungsapparat der Zellen weitergeleitet.
- Chemotaxis ist ein **weit verbreitetes Verhalten** vieler Bakterien, einschließlich pathogener Krankheitserreger.

verbunden. Wenn sich alle Flagellenmotoren einer Zelle gegen den Uhrzeigersinn drehen (*counterclockwise*, CCW), formen alle Flagellen zusammen ein sogenanntes Superbündel, das die Zelle vorantreibt. Dadurch schwimmen die Zellen im „Run“-Modus geradeaus (Abbildung 3). Bindet CheY-P an ein spezielles Protein an der Basis des Flagellenmotors, löst es dort eine Konformationsänderung aus, was eine Umkehr der Drehrichtung zur Folge hat. Drehen sich ein Teil oder alle Flagellenmotoren im Uhrzeigersinn (*clockwise*, CW), löst sich das Flagellenbündel auf und die Zellen beginnen, auf der Stelle zu taumeln („Tumble“). Geht die Bewegung wieder in den „Run“-Modus über, schwimmt die Zelle in eine neue Richtung weiter. Das Chemotaxissystem kontrolliert die Länge und Frequenz der „Run“- und „Tumble“-Phasen und ermöglicht es den Zellen auf diese Weise, einem Nährstoffgradienten zu folgen (Abbildung 3). Dabei ist das Chemotaxissystem extrem empfindlich und anpassungsfähig: So reichen bereits wenige Nährstoffmoleküle aus, um das System zu aktivieren, und die Zellen können Nährstoffkonzentrationen über fünf Größenordnungen wahrnehmen [2].

Diese Fähigkeit einem Konzentrationsgradienten zu folgen, beruht auf einem zeitlichen Erinnerungsvermögen: Die Zellen können ihre augenblickliche Situation mit der Vergangenheit vergleichen und feststellen, ob sich die Situation in Bezug auf einen Lock- oder Schreckstoff verbessert oder verschlechtert hat. Auf diese Weise können sie eine Nährstoffquelle finden bzw. einen Schreckstoff meiden und dadurch den jeweils gerade optimalen Lebensraum erreichen. Möglich macht dies eine reversible Methylierung der Chemorezeptoren, die durch die Proteine CheR und CheB geregelt wird. Dabei ist CheR eine Methyltransferase und überträgt Methylgruppen auf die MCPs, wohingegen die Methylsterase CheB diese wieder entfernt.

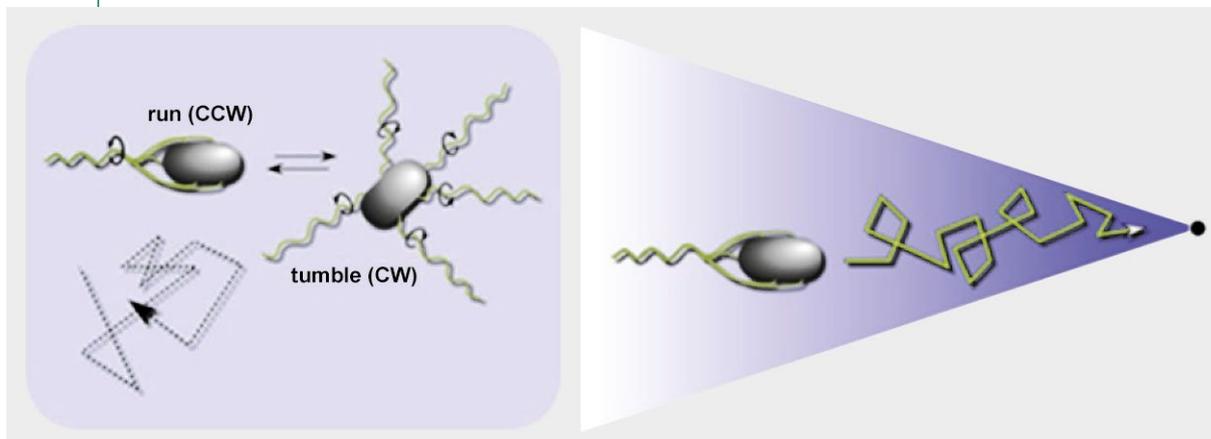
CheR ist ein konstitutiv aktives Enzym, das kontinuierlich die Rezeptoren methyliert. Im Gegensatz dazu wird CheB von CheA phosphoryliert und erst dadurch aktiviert. Hierbei ist es von besonderer Bedeutung, dass die Entfernung der Methylgruppen von den Rezeptoren durch phosphoryliertes CheB (CheB-P) deutlich langsamer erfolgt als die Signalübertragung von CheY-P zu den Flagellenmotoren.

Sowohl das Botenprotein CheY als auch die Methylsterase CheB werden von CheA aktiviert. Hierbei bewirkt CheY-P zunächst eine rapide Änderung der Drehrichtung des Flagellenmotors, so dass sich die Motoren im Uhrzeigersinn drehen. Dies wiederum hat zur Folge, dass die Zelle zu taumeln beginnt. CheB-P wird ebenfalls aktiv, allerdings geschieht die darauffolgende Demethylierung der Rezeptoren wie erwähnt wesentlich langsamer als die Bindung von CheY-P an die Flagellenmotoren. Sind die Rezeptoren vorwiegend demethyliert, inaktiviert dies wiederum das Enzym CheA. Diese Inaktivierung beendet die Phosphorylierung von CheY, was zur Folge hat, dass sich die Drehrichtung der Flagellenmotoren erneut ändert. Die Motoren drehen sich wieder gegen den Uhrzeigersinn und die Zellen schwimmen geradeaus [2]. Das System hat sich nun an die gegenwärtige Situation angepasst und kann deshalb erneut auf Lock- oder Schreckstoffe reagieren.

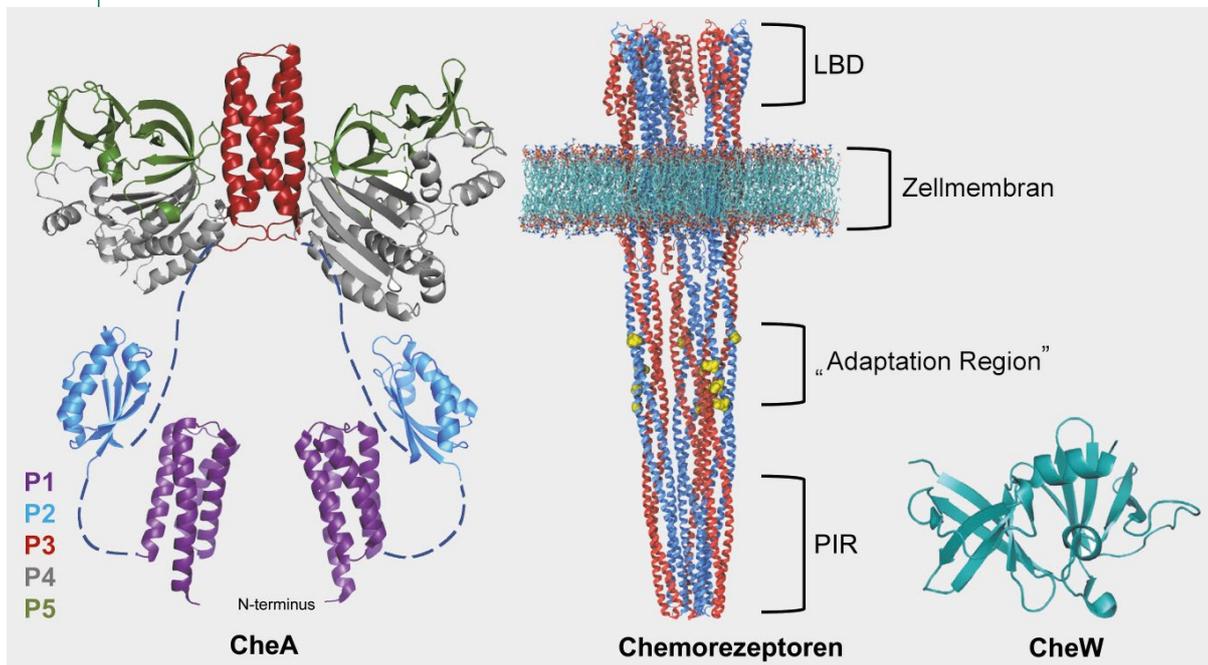
### Aufbau der Chemorezeptorkomplexe von *E. coli*

Obwohl alle Komponenten des Chemotaxissystems schon lange bekannt sind, wurden der genaue Aufbau der Chemorezeptorkomplexe und der zugrundeliegende molekulare Mechanismus der Signalübertragung erst im letzten Jahrzehnt weitgehend aufgeklärt. Dass die Rezeptoren in Komplexen an den Zellpolen vorkommen, konnte 1993 mit immunmarkierten MCPs anhand von traditioneller

**ABB. 3 | FORTBEWEGUNG BEI *E. COLI***



Das Bakterium verfügt über zwei Bewegungsarten (links): Im „Run“-Modus schwimmt es geradlinig, wobei sich alle Flagellen gegen den Uhrzeigersinn drehen. Dadurch formen sie gemeinsam ein „Superbündel“, das die Zellen vorantreibt. Drehen sich eine oder mehrere Flagellen im Uhrzeigersinn, löst sich das Flagellenbündel auf, und die Zelle taumelt auf der Stelle („Tumble“). Rechts: Mit Kontrolle der Länge und Frequenz der Schwimm- und Taumelphasen gelingt es den Zellen, Nährstoffgradienten zu folgen und optimale Umgebungen aktiv aufzusuchen. Abbildung mit Genehmigung von Prof. John S. Parkinson, University of Utah.

**ABB. 4 | KOMPONENTEN DER CHEMOREZEPTORGITTER IN E. COLI**


**Links:** Das Enzym CheA formt Homodimere. Jedes CheA-Protein besteht aus 5 Domänen (P1-P5), von denen jede eine spezielle Aufgabe erfüllt: P1: Diese Domäne enthält das Substrathistidin, also das Histidin, das die Phosphorylgruppe auf CheY überträgt. P2: Bindungsstelle für das Botenprotein CheY. P3: Dimerisationsdomäne. P4: Kinasedomäne. P5: Rezeptorbindungsdomäne. **Mitte:** Die membrangebundenen Chemorezeptoren formen Trimere aus Rezeptorhomodimeren. Die Lock- und Schreckstoffe binden an die Ligandenbindungsdomäne (LBD). CheA und CheW binden an die cytoplasmatischen Enden der Chemorezeptoren („Protein Interactions Region“, PIR). Der Methylierungszustand der Rezeptoren wird durch die Enzyme CheR und CheB in der sogenannten „Adaptation Region“ kontrolliert. **Rechts:** Das Linkerprotein CheW kommt als Monomer vor. Strukturell ähnelt es der P5-Domäne von CheA. Abbildung von Alise Muok und Keith Cassidy.

Elektronenmikroskopie nachgewiesen werden [3]. Allerdings ist diese Methode unzureichend, um den genauen strukturellen Aufbau der Komplexe aufzulösen. Die einzelnen Komponenten, unter anderem der cytoplasmatische Teil des Serin-Chemorezeptors Tsr [4], das Enzym CheA [5] und auch CheW [6] konnten anhand von Kristallographie oder Kernspinresonanzspektroskopie strukturell bestimmt werden. Diese Studien haben wichtige Einblicke in den Aufbau dieser Proteine gegeben.

Das Linkerprotein CheW kommt als Monomer vor, im Gegensatz dazu formt CheA Homodimere. Jedes CheA besteht dabei aus fünf Domänen (P1-P5), wobei alle Domänen eine spezielle Aufgabe erfüllen. So wird zum Beispiel die Bildung von Homodimeren durch die P3-Domänen ermöglicht. Dagegen ist die Domäne P2 für die Bindung an das Botenprotein CheY verantwortlich. Die Übertragung der Phosphorylgruppe von einem ATP auf CheY und CheB wird durch die Domänen P1 und P4 katalysiert. Hierbei bindet ATP zunächst an die Kinasedomäne (P4). Anschließend wird die Phosphorylgruppe von dem gebundenen ATP auf die Domäne P1 übertragen – die Histidinkinase ist autophosphoryliert und bereit, von den Rezeptoren aktiviert zu werden. Interessanterweise wird die Phosphorylgruppe hierbei auf die P1-Domäne des CheA-Partnermoleküls im Dimer übertragen. Dieser Vorgang macht

deutlich, dass das Enzym nur als Dimer funktionell ist. Zu guter Letzt ist die P5-Domäne für die Bindung an die Rezeptoren verantwortlich (Abbildung 4). Das Linkerprotein CheW, das ebenfalls an die Rezeptoren bindet, ist der P5-Domäne von CheA strukturell sehr ähnlich. Die Chemorezeptoren wiederum formen Trimere aus Rezeptorhomodimeren.

Wie genau diese einzelnen Komponenten zusammen einen makromolekularen Komplex bilden, um kooperativ Signale aus der Umwelt aufzunehmen und in die Zelle weiterzuleiten, war damit aber immer noch ungeklärt. Ein entscheidender Durchbruch konnte mithilfe der Kryoelektronentomographie erreicht werden. Diese Methode erlaubt die dreidimensionale Analyse von naturbelassenen Chemorezeptorkomplexen in ganzen Zellen und mit makromolekularer Auflösung. In Kombination mit Kristallographie von Einzelkomponenten konnte damit zum ersten Mal der genaue Aufbau bestimmt werden (Abbildung 5, [7, 8]). Die kleinste, chemotaktisch aktive Untereinheit besteht aus zwei Trimeren von Rezeptordimeren, einem CheA-Dimer und zwei CheW-Monomeren. Hierbei binden die P5-Domänen von CheA an die Linkerproteine und formen das sogenannte „Interface 1“ (Abbildung 5a). Viele dieser aktiven Untereinheiten verbinden sich zu einem hochgeordneten, ausgedehnten Gitter.

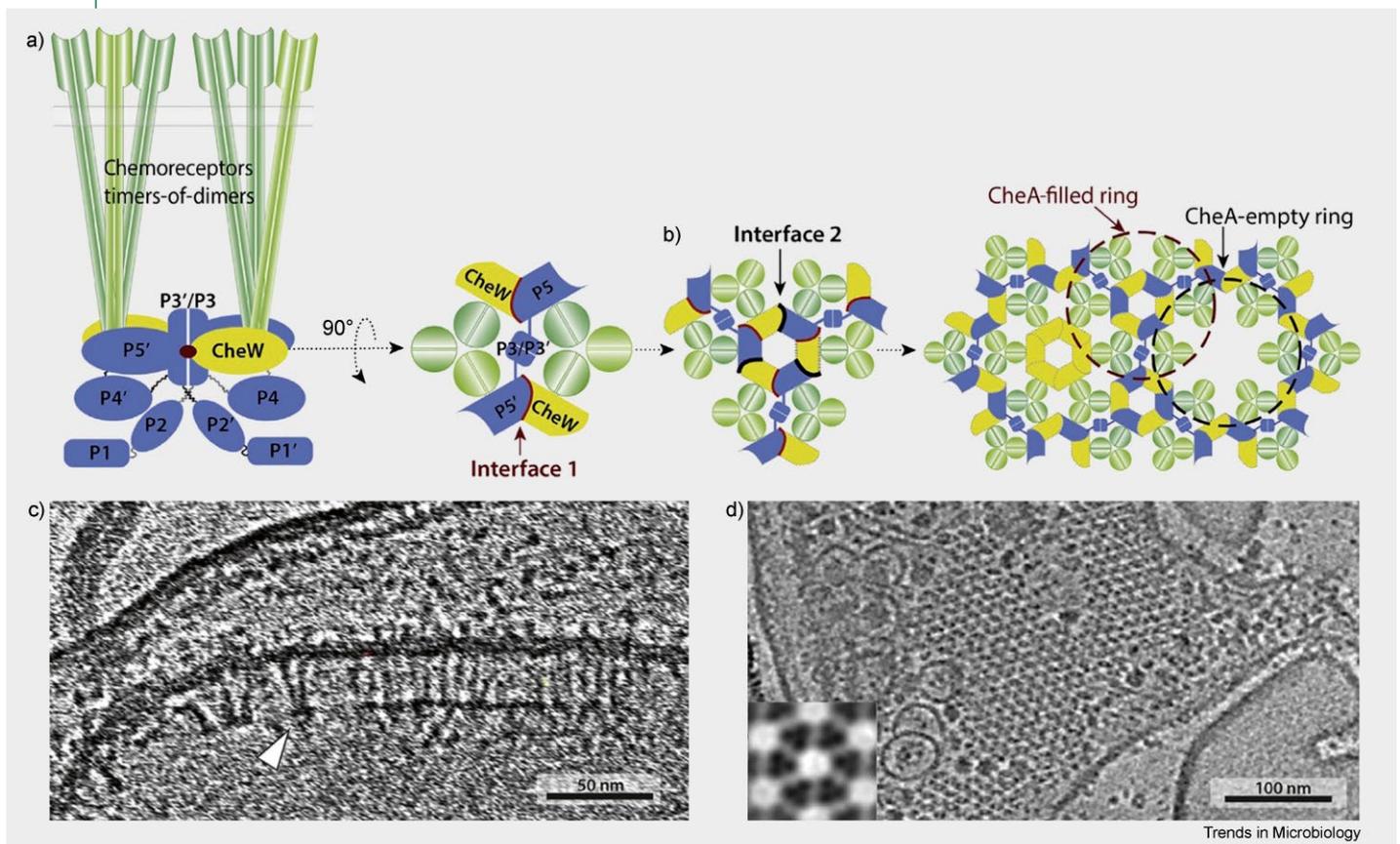
Hierbei bindet jeweils die P5-Domäne von einer CheA-Untereinheit an ein CheW einer benachbarten Untereinheit und formt das sogenannte „Interface 2“ (Abbildung 5b). In der Gitteraufsicht wird die Anordnung der einzelnen Komponenten deutlich: CheA-P5-Domänen und CheW-Proteine wechseln sich ab und formen regelmäßige Ringe. Jeder Ring enthält dabei jeweils drei „Interface 1“- und „Interface 2“-Verbindungen. Benachbarte Ringe sind über die CheA-P3-Dimer-Domänen verbunden. Jeweils sechs Ringe aus CheA-P5-CheW umschließen einen zentralen Ring, der kein CheA enthält. Dieser Ring kann teilweise oder vollständig mit CheW-Proteinen gefüllt sein (Abbildung 5b). Die gebundenen Rezeptortrimere formen ausgedehnte, hochgeordnete hexagonale Gitter. Diese sind in der Kryoelektronentomographie sowohl

in der Seitenansicht (Abbildung 5c) als auch in der Aufsicht (Abbildung 5d) deutlich zu erkennen.

### Signalübertragung in den Chemorezeptorgittern

Was für Konformationsänderungen geschehen nun im Rezeptorgitter, wenn Lock- oder Schreckstoffe an die Rezeptoren binden? Diese Frage beschäftigt Wissenschaftler bis zum heutigen Tag. Sie ist schwer zu beantworten: Hochauflösende Methoden sind essentiell, um die molekularen Vorgänge im Detail zu verstehen, aber ihre Durchführung ist an den ausgedehnten Gittern nicht möglich. Auf der anderen Seite ist Kryoelektronentomographie noch nicht in der Lage, die nötige Auflösung zu erreichen, um den gesamten Vorgang auf atomarer Ebene sichtbar zu

**ABB. 5 | DIE ARCHITEKTUR DER CHEMOREZEPTORGITTER IN *E. COLI***



(a) Schematische Seitenansicht und Aufsicht der kleinsten chemotaktisch aktiven Untereinheit (bestehend aus 2 Trimeren aus Rezeptordimeren (grün), einem CheA Dimer (blau) und zwei CheW-Monomeren (gelb)). In dieser Signaluntereinheit bindet CheW die P5-Domäne von CheA über eine Schnittstelle, das sogenannte „Interface 1“, das mit einer dunkelroten Linie markiert ist. (b) Die einzelnen Signaluntereinheiten formen zusammen ein ausgedehntes, regelmäßiges Gitter, in dem CheA-P5 und CheW von verschiedenen Signaluntereinheiten über das „Interface 2“ verbunden sind (schwarze Linie). Die Rezeptoren formen dabei ein hexagonales Gitter, wobei an jeder Ecke des Hexagons ein Trimer aus Rezeptordimeren sitzt. CheA-P5 und CheW formen Ringe (mit abwechselnden „Interface 1“- und „Interface 2“-Schnittstellen). Benachbarte Ringe sind über die Dimerisationsdomänen von CheA (P3) miteinander verbunden. Die Ringe beinhalten entweder drei CheA-P5-Domänen (dunkelroter Ring) oder kein CheA (schwarzer Ring). (c) Kryoelektronentomographische (cryoET) Abbildung eines Chemorezeptorgitters in Seitenansicht und eines Flagellenmotors (links). Der Pfeil zeigt auf die Rezeptorenden an denen CheA und CheW binden. (d) CryoET-Aufnahme eines Chemorezeptorgitters von oben. Die regelmäßige Anordnung der Rezeptoren ist gut zu erkennen. Inset: Ein individuelles Hexagon aus sechs Trimeren von Rezeptordimeren nach Bildverarbeitung einer elektronentomographischen Aufnahme. Abbildung reproduziert aus [9] mit Genehmigung von Trends in Microbiology.

machen. Allerdings konnten einige Aspekte in den letzten Jahren aufgeklärt werden: Werden die Rezeptoren aktiviert oder deaktiviert, ändert sich die Konformation der Trimere im Gitter: Im die Histidinkinase CheA aktivierenden Zustand spreizen sich die Trimere weiter auseinander, wohingegen sich die Dimere im nicht-aktivierenden Zustand, ähnlich einem Reißverschluss, aneinander annähern [10]. Diese strukturelle Veränderung ist besonders deutlich am sogenannten „Glycin-Scharnier (*glycine hinge*)“, das sich im cytoplasmatischen Teil der Rezeptoren befindet (Abbildung 6). Die Signale werden von den Rezeptoren über das Linkerprotein CheW auf die Histidinkinase übertragen und bewirken auch hier Konformationsänderungen. So wurde vor allem eine Kippbewegung der Kinasedomäne P4 beobachtet [11]. Im aktiven Zustand ist diese Domäne der rezeptorbindenden P5-Domäne angehängt. Dagegen sind die beiden Domänen P1 und P2 frei beweglich und ermöglichen die Übertragung der Phosphorylgruppen auf das Botenprotein CheY [12]. Im inaktiven Zustand vergrößert sich der Abstand der P4-Domäne von P5, und die P1- und P2-Domänen sind unproduktiv gebunden (Abbildung 6).

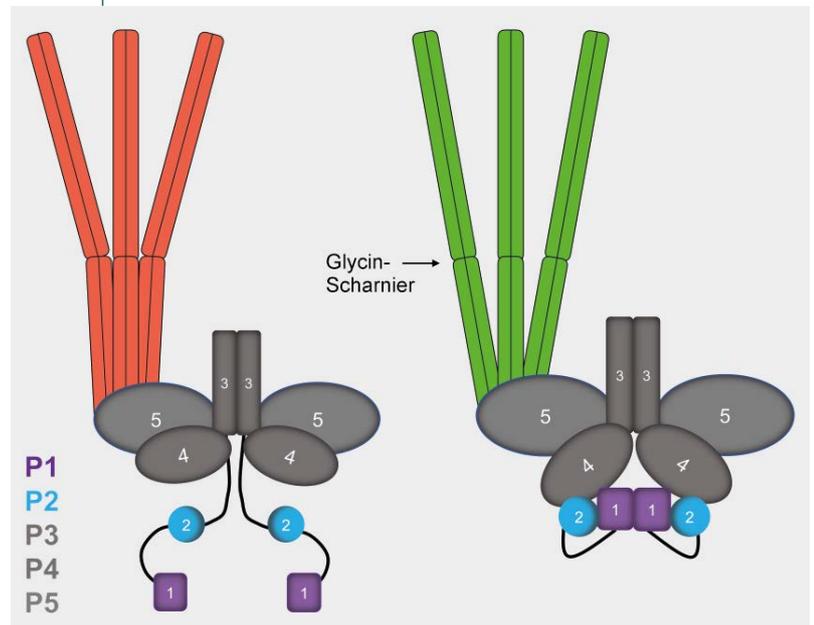
Ein weiterer Aspekt der Gitter ist die hohe Kooperativität der Rezeptoren. Es ist lange bekannt, dass die Rezeptoren ihren Bindungszustand nicht nur auf die direkt gebundene Histidinkinase übertragen, sondern dass sich das Signal über das Gitter überträgt und auch die Aktivität nicht direkt gebundener Kinaseenzyme in der Nachbarschaft kontrolliert. Hierbei ist auf jeden Fall das „Interface 2“ von entscheidender Bedeutung: Wird diese Bindungsschnittstelle gestört, geht die Kooperation verloren [13]. Ob und was für andere Faktoren zu dem kooperativen Verhalten beitragen, muss noch genau erforscht werden.

### Chemorezeptorgitter in anderen Bakterien

Das hier beschriebene Chemotaxissystem von *E. coli* ist eines der am besten untersuchten Signaltransduktionssysteme in der Biologie. Chemotaxis kommt allerdings nicht nur in diesem Modellorganismus vor, sondern es ist unter beweglichen Bakterien weit verbreitet. Generell sind einige Grundkomponenten konserviert wie zum Beispiel die Kinase, das Linkerprotein und auch die Komponenten der Rezeptoren, die mit diesen beiden Proteinen interagieren. Darüber hinaus ist die hexagonale Anordnung der Rezeptoren universell und wurde in allen derzeit strukturell untersuchten Chemotaxissystemen sowohl in Bakterien als auch in Archaeen beobachtet. Allerdings gibt es auch deutliche Unterschiede zwischen dem *E. coli*-Modellsystem und anderen Organismen. Zum Beispiel gibt es Bakterien, die weit mehr als nur fünf verschiedene Chemorezeptoren besitzen wie *Magnetospirillum magnetotacticum*, das 59 verschiedene Rezeptoren im Genom kodiert.

Auch die Domänen der Rezeptoren, die an Liganden binden, weisen eine enorme Vielfalt auf. Diese Variabilität ist damit zu erklären, dass Bakterienarten sehr unter-

ABB. 6 | SIGNALÜBERTRAGUNG AN DEN CHEMOREZEPTORGITTERN



Wenn die Histidinkinase aktiviert ist (links), sind die Rezeptoren in der Region um das „Glycin-Scharnier“ aufgespreizt. Dies beeinflusst wiederum die Konformation des Enzyms: Die P4-Domäne nähert sich an die rezeptorbindende P5-Domäne an. Die beiden Domänen P1 und P2 sind frei beweglich und erlauben die Übertragung der Phosphorylgruppe auf das Botenprotein CheY. Wenn die Histidinkinase inaktiv ist (rechts), kommen sich die Rezeptoren näher, die P4-Domäne entfernt sich von der P5-Domäne, und die P1- und P2-Domänen bleiben in einem unproduktiven Zustand an den Rest des Enzyms gebunden. Abbildung von Dr. Alise Muok.

schiedliche Lebensräume besiedeln und daher auch auf sehr verschiedene Lock- und Schreckstoffe reagieren müssen. Darüber hinaus besitzen viele Bakterien zusätzliche Chemotaxisproteine, die nicht in *E. coli* zu finden sind. Ein Beispiel hierfür ist CheV, eine Chimere, die aus einem CheW-ähnlichem und einem CheY-ähnlichem Anteil besteht und ebenfalls in die Gitter eingebaut ist. CheV kommt unter anderem im Choleraerreger *Vibrio cholerae* vor und ist nachgewiesenermaßen in die Anpassung an die Umgebung involviert und darüber hinaus wichtig, um bestimmte Rezeptoren in das Gitter einzufügen. ParP ist eine weitere Komponente, die ebenfalls im Gitter von *Vibrio cholerae* zu finden ist. Dieses Protein ist sowohl für die Gitterformation als auch für die korrekte Lokalisation der Gitter am Zellpol mitverantwortlich.

Sowohl die Kombination verschiedener Proteine, die an die Rezeptoren binden, als auch deren Stöchiometrie resultiert in einer Vielfalt an verschiedenen Gitterkompositionen. Diese Gitter unterscheiden sich sowohl in ihrer strukturellen Zusammensetzung als auch in ihren Eigenschaften: So ist mittlerweile bekannt, dass die unterschiedlichen Gitter auch unterschiedlich stabil sind. In *E. coli* sind die Gitter beispielsweise ultrastabil und überstehen sogar das Platzen von Zellen unversehrt. Allerdings mag diese Stabilität nicht immer von Vorteil sein, vor allem in

Bakterien, die häufig ihren Lebensraum wechseln wie *V. cholerae*. Der Choleraerreger kann in freien Wasserkörpern gut überleben. Wird es aber von einem Menschen über verseuchtes Trinkwasser aufgenommen, kolonisiert es den Darm. Dieser Lebensraumwechsel ist extrem: Fast alle Bedingungen unterscheiden sich von denen in der Umwelt wie zum Beispiel der pH-Wert, der Salzgehalt, die Umgebungstemperatur und die verfügbaren Nährstoffe. Haben sich die Bakterien im Darm etabliert, lösen sie den für Cholera typischen heftigen Durchfall aus. Hierbei wird ein Großteil der Bakterien wieder in die Umwelt ausgeschieden und der Zyklus kann erneut beginnen. Tatsächlich sind die Chemorezeptoren in *V. cholerae* im Gegensatz zu denen von *E. coli* fragil und fallen leicht auseinander, sobald die Zelle beschädigt ist. Diese Eigenschaft könnte für *V. cholerae* vorteilhaft sein, da sie den Zellen möglicherweise erleichtert, die Komposition der Rezeptoren im Gitter genau an die Umweltbedingungen anzupassen.

Interessanterweise besitzen mehr als die Hälfte aller chemotaktischen Bakterien nicht nur ein, sondern zwei oder sogar mehrere Chemotaxissysteme. Dass diese Systeme jeweils strukturell unterschiedliche Gitter formen, wurde in verschiedenen Organismen beobachtet. Vermutlich verhindert diese strukturelle Trennung die Vermischung unterschiedlicher Signale; allerdings ist dieser Aspekt noch nicht gut untersucht. Auch ist die Funktion der verschiedenen Gitter oft unklar, denn nicht immer kann eine Kontrolle des Bewegungsapparates nachgewiesen werden. Zusätzlich zu den membrangebundenen Systemen wie in *E. coli* gibt es auch vollständig cytoplasmatische Systeme. Hierbei formen sich die Gitter aus jeweils zwei Schichten: Jeweils zwei Rezeptorgitter mit gebundenem CheA und CheW formen eine Art Sandwich, wobei die Rezeptoren der beiden Gitter in der Mitte überlappen. Die Funktion dieser cytoplasmatischen Gitter ist momentan noch weitgehend unbekannt. Am besten verstanden sind sie im Bakterium *Rhodobacter sphaeroides*, in dem sie den metabolischen Zustand der Zelle bestimmen und zusammen mit einem membrangebundenen System für chemotaktisches Verhalten notwendig sind [10].

### Ausblick der Chemotaxisforschung

Das Chemotaxisverhalten der Bakterien fasziniert Wissenschaftler auch in der heutigen Zeit, und die aktive Forschung an diesem Thema geht ungebremst weiter. Und das ist verständlich: Chemotaxis ist ein wichtiger Bestandteil im Lebenszyklus vieler für Mensch und Umwelt bedeutender Mikroorganismen. Es hilft diesen dabei, sich in ihrer Umwelt zurechtzufinden und den für sie geeigneten Lebensraum zu besiedeln. Das Chemotaxissystem beruht auf einer überschaubaren Anzahl an Einzelkomponenten, und dennoch ist es in seiner Funktion sehr komplex. Man kann es als eine Art bakterielles Gehirn betrachten, das sogar ein Erinnerungsvermögen aufweist. Ungeachtet der Tatsache, dass viele Aspekte dieses Systems in *E. coli* mittlerweile gut erforscht sind, bleiben selbst hier einige Fra-

gen unbeantwortet, beispielsweise wie genau das Signal übertragen wird, oder welche Aspekte das kooperative Verhalten der Rezeptoren ermöglichen.

Chemotaktisches Verhalten spielt auch eine entscheidende Rolle in einigen bedeutenden Krankheitserregern. So ermöglicht es den pathogenen Bakterien, sowohl Infektionen zu etablieren als auch sie aufrechtzuerhalten [14]. Hierzu zählen zum Beispiel die Erreger der Magenschleimhautentzündung (*Helicobacter pylori*), der Campylobacter-Enteritis (*Campylobacter jejuni*), von *Pseudomonas*-Infektionen (*Pseudomonas aeruginosa*) und der Cholera (*Vibrio cholerae*). Die ausschlaggebenden chemotaktischen Signale sind hierbei häufig vom Wirt produzierte Zwischenprodukte des Stoffwechsels. Chemotaktisches Verhalten hat aber nicht nur eine Bedeutung für menschliche oder tierische Krankheitserreger, sondern ebenso für Bakterien, die an oder in Pflanzen vorkommen. Eine nachgewiesene Rolle spielt Chemotaxis vor allem in der Rhizosphäre - dem Raum im Boden, der direkt von lebenden Pflanzenwurzeln beeinflusst ist. Die meisten Bakterien, die in der Rhizosphäre vorkommen, sind beweglich und chemotaktisch. Dazu gehören auf der einen Seite Symbionten wie zum Beispiel das Bakterium *Sinorhizobium mellotti*, das in Symbiose mit Hülsenfrüchten lebt und Stickstoff fixiert. Auf der anderen Seite gehören auch Krankheitserreger dazu wie zum Beispiel *Ralstonia solanacearum*, das das Welken in einer Reihe von Nutzpflanzen auslöst, etwa in Tabak, Tomaten, Paprika, Aubergine und Kartoffeln. Die Bakterien der Rhizosphäre können vor allem Chemikalien, die von Wurzeln oder Blättern ausgeschieden werden, wahrnehmen wie zum Beispiel organische Säuren, Pflanzenhormone, Zuckersäuren oder Kohlenhydrate [14]. Wie in den menschlichen Krankheitserregern spielt Chemotaxis auch hier eine Rolle in der Besiedlung und Etablierung von Infektionen.

Kann das Chemotaxissystem gezielt verwendet werden, um neue Behandlungsmethoden gegen diese Bakterien zu entwickeln? Dies ist besonders im Hinblick auf die wachsende Anzahl an antibiotikaresistenten pathogenen Bakterien eine wichtige Frage für die angewandte medizinische Forschung. Zum anderen wird die Bedeutung von mikrobiellen Gemeinschaften, dem sogenannten Mikrobiom, immer deutlicher. Auch hier spielt Chemotaxis mit großer Wahrscheinlichkeit eine bedeutende Rolle - welche genau, muss allerdings noch untersucht werden. Auch für die Industrie ist das bakterielle Chemotaxissystem interessant: So könnten Bakterien in Zukunft als Biosensoren dazu benutzt werden, Umweltgifte zu erkennen und sogar gleich abzubauen oder Krankheiten anhand von Indikatoren im Blut oder Urin zu erkennen. Einzelne Forschungsberichte über derartige Anwendungen sind in Bearbeitung oder wurden bereits publiziert. Mithilfe von verbesserten und neuen Methoden vor allem in den Bereichen der Mikroskopie, Bildverarbeitung und Bioinformatik werden in den nächsten Jahren sicher grundlegende Einsichten in dieses faszinierende System möglich.

## Zusammenfassung

Viele bewegliche Bakterien sind in der Lage, mithilfe von ausgedehnten Rezeptorgittern ihre chemische Umwelt wahrzunehmen und ihren Bewegungsapparat dementsprechend zu kontrollieren. Das System ist hochempfindlich und kann Nährstoffe in Konzentrationen über fünf Größenordnungen wahrnehmen. Darüber hinaus können die Bakterien den gegenwärtigen Zustand mit der Vergangenheit vergleichen, was ihnen ermöglicht, Nährstoffgradienten zu verfolgen. Dieses Verhalten wird Chemotaxis genannt und ermöglicht den Bakterien, optimale Lebensräume aufzusuchen. Chemotaxis ist eines der am besten verstandenen Signaltransduktionssysteme in der Biologie, und der genaue Aufbau und die Funktion der einzelnen Komponenten ist mittlerweile besonders im Modellsystem *E. coli* gut untersucht. Chemotaxis wird auch von pathogenen Bakterien verwendet und ist ein wichtiger Bestandteil für einen ungestörten Infektionsverlauf. Neue Forschungsergebnisse zeigen, dass die Grundstruktur der Gitter, in denen die Komponenten der Chemotaxis angeordnet sind, in unterschiedlichen Bakterien vom bekannten Modellsystem *E. coli* abweichen kann.

## Summary

### Bacterial sensory complexes for environmental navigation

Many motile bacteria rely on extensive chemoreceptor arrays to sense their chemical environment and control their motility apparatus. This enables the bacteria to follow nutrient gradients by comparing their current condition with that one of the recent past. This system is highly sensitive and can respond to nutrient concentrations over five orders of magnitude. This behaviour is called chemotaxis and enables the bacteria to seek out favourable environments. Chemotaxis is one of the best understood signal transduction systems in biology, and the structure and function of the chemoreceptor arrays is well understood in the model system of *E. coli*. Furthermore, chemotaxis is also a key behaviour in the infection process of pathogenic bacteria. New research findings show that chemoreceptor array architecture can differ from the model system of *E. coli*, and that we find a great variability with regard to other bacterial species.

## Schlagworte

Chemotaxis, Chemorezeptoren, Bakterien, Signaltransduktion, bakterielles Verhalten.

## Literatur

- [1] J. Adler (1966). Chemotaxis in Bacteria. *Science* 153, 708–716.
- [2] G. L. Hazelbauer et al. (2008). Bacterial chemoreceptors: high-performance signaling in networked arrays. *Trends Biochem Sci* 33, 9–19.
- [3] J. R. Maddock, L. Shapiro (1993). Polar location of the chemoreceptor complex in the *Escherichia coli* cell. *Science* 259, 1717–1723.
- [4] K. K. Kim et al. (1999). Four-helical-bundle structure of the cytoplasmic domain of a serine chemotaxis receptor. *Nature* 400, 787–792.
- [5] A. M. Bilwes et al. (1999). Structure of CheA, a signal-transducing histidine kinase. *Cell* 96, 131–141.
- [6] I. J. Griswold et al. (2002). The solution structure and interactions of CheW from *Thermotoga maritima*. *Nat Struct Mol Biol* 9, 121–125.
- [7] J. Liu et al. (2012). Molecular architecture of chemoreceptor arrays revealed by cryoelectron tomography of *Escherichia coli* minicells. *Proc Natl Acad Sci USA* 109, E1481–E1488.
- [8] A. Briegel et al. (2012). Bacterial chemoreceptor arrays are hexagonally packed trimers of receptor dimers networked by rings of kinase and coupling proteins. *PNAS USA* 109, 3766–3771.
- [9] W. Yang, A. Briegel (2019). Diversity of Bacterial Chemosensory Arrays. *Trends Microbiol.* 28, 68–80.
- [10] W. Yang et al. (2019). In Situ Conformational Changes of the *Escherichia coli* Serine Chemoreceptor in Different Signaling States. *MBio* 10, <https://journals.asm.org/doi/10.1128/mBio.00973-19>
- [11] C. K. Cassidy et al. (2020). Structure and dynamics of the *E. coli* chemotaxis core signaling complex by cryo-electron tomography and molecular simulations. *Commun Biol* 3, 24.
- [12] A. R. Muok et al. (2020). Regulation of the chemotaxis histidine kinase CheA: A structural perspective. *Biochim Biophys Acta Biomembr* 1862, 183030.
- [13] G. E. Pinas et al. (2016). The source of high signal cooperativity in bacterial chemosensory arrays. *PNAS USA* 113, 3335–40.
- [14] M. A. Matilla, T. Krell (2018). The effect of bacterial chemotaxis on host infection and pathogenicity. *FEMS Microbiol Rev* 42, <https://doi.org/10.1093/femsre/fux052>

## Verfasst von:



Ariane Briegel hat an der LMU in München Biologie studiert. Nach ihrem Diplomabschluss promovierte sie 2005 an der TU München mit dem Thema „Strukturuntersuchungen an Prokaryoten mit Kryo-Elektronentomographie“. Danach nahm sie eine Postdoc-Position am Caltech in den USA an, wo sie ihre Forschung an bakterieller Ultrastruktur fortsetzte. Seit 2015 ist sie Professorin am Institut für Biologie an der Leiden Universität in den Niederlanden. Sie ist außerdem Co-Direktorin am Cryo-EM Zentrum NeCEN.

### Korrespondenz:

Prof. Dr. Ariane Briegel  
 Leiden University  
 Sylvius Laboratorium  
 Sylviusweg 72  
 NL-2333 BE Leiden  
 E-Mail: [a.briegel@biology.leidenuniv.nl](mailto:a.briegel@biology.leidenuniv.nl)



## Kompetenzorientierte Lehr-Lernarrangements zur Modellierung von Blütenmodellen mit 3D-Druck

# Biologieunterricht praktisch und digital

MARCEL BONORDEN | KAI MEINDERS | SASCHA OFFERMANN |  
ANJA RIEMENSCHNEIDER | JUTTA PAPENBROCK

*Was haben die Technik des 3D-Drucks, natürliche Blütenvielfalt und junge motivierte Schüler/-innen gemeinsam? Sie alle sind Teil des Projekts „Blühende Fantasie – 3D-Druck von Blütenmodellen“ des Instituts für Botanik der Leibniz Universität Hannover. Das Projekt, das mit sechs Teilnehmenden an einer Schule begann (vgl. [1], S. 312), wurde inzwischen an drei Hannoveraner Schulen mit insgesamt 54 Schüler/-innen durchgeführt. Das ursprüngliche Unterrichtskonzept wurde an die Gegebenheiten in großen Gruppen und ganzen Schulklassen angepasst. Mit einer verbesserten Stichprobengröße konnte untersucht werden, inwiefern Schüler/-innen durch die kreative Gestaltung eigener Blütenmodelle mittels 3D-Druck botanisches Fachwissen sowie Fähigkeiten im computergestützten, dreidimensionalen Modellieren erlangen können. Während die Erforschung dieses Unterrichtsansatzes an den aktuellen Diskurs von innovativem Biologieunterricht anknüpft, wird die Wirksamkeit durch Ergebnisse, die auf einen Zuwachs von botanischem Fachwissen deuten, belegt.*

Spricht man mit Schüler/-innen über das Themengebiet 3D-Druck, kommen sofort Assoziationen zu hochkomplexen Maschinen, die in der Medizintechnik oder Luftfahrt individuelle Bauteile erzeugen. Umso größer ist die Motivation, wenn das Thema aus dem wissenschaftlich-industriellen Bereich in die Lebenswelt der Lernenden überführt wird, was in diesem Projekt am Institut für Botanik mithilfe der Modellierung von Blütenmodellen umgesetzt werden soll. Aktuelle didaktische Studien zur Entwicklung und Förderung botanischen Fachwissens verbinden außerschulische Lernorte wie botanische Gärten mit dem Einsatz digitaler Medien [2]. Das Projekt „Blühende Fantasie – 3D-Druck von Blütenmodellen“ knüpft an diesen Diskurs in neuartiger Weise durch Modellierung und dem 3D-Druck realer Blüten an.

Dem 3D-Druck liegt das Modellieren von Objekten am Computer mittels *computer-aided design*-(CAD)-Technologie zugrunde. Um druckbare Modelle zu entwickeln, müssen diese zunächst in einer 3D-Design-Software erstellt werden – eine Fähigkeit, die längst nicht mehr ausschließlich in technischen Berufen gefragt ist. Daher wird es zunehmend wichtiger, CAD und 3D-Druck bereits in den Schulalltag zu integrieren und auf diese Weise wertvolle Fähigkeiten für die moderne Arbeitswelt zu fördern. Der Einsatz von Modellierung und 3D-Druck im Unterricht

verbindet die Planung, Erstellung und kritische Bewertung des Modells miteinander und fördert sowohl theoretische, fachliche Kompetenzen als auch praktische Fähigkeiten. Durch den Druck von vorab modellierten Objekten werden die Schüler/-innen physisch mit den Ergebnissen ihrer Arbeit konfrontiert und Virtualität mit Realität verbunden. Bei näherer Betrachtung ergeben sich einige Anwendungsmöglichkeiten von 3D-Druckern im schulischen Kontext, beispielsweise in Kooperation mit technisch orientierten AGs oder im Rahmen von naturwissenschaftlich-technischen Unterrichtsprofilen. Im naturwissenschaftlichen Unterricht eignen sich 3D-Drucker besonders für die Herstellung eigener Modelle. Preece et al. ([3], S. 223) weisen signifikante Vorteile durch die Benutzung von physischen Modellen in der Bildung im Gegensatz zu Abbildungen und 3D-Computermodellen nach.

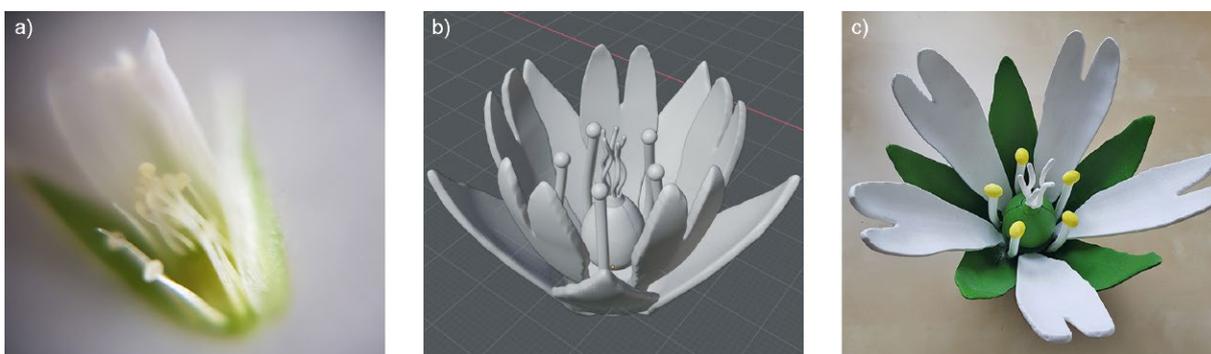
In der naturwissenschaftlichen Didaktik wird davon ausgegangen, dass das Lernen mit Modellen und Modellieren den Lernerfolg durch die Förderung kognitiver, metakognitiver, sozialer und erkenntnisgewinnender Fähigkeiten erhöhen kann ([4], S. 477). Das 3D-Druck-Projekt des Instituts für Botanik setzt hier an. In mehreren Unterrichtseinheiten modellieren und drucken die Schüler/-innen ihre eigenen naturgetreuen Blütenmodelle. Während sich ein vorangegangener Projektdurchlauf (Durchlauf 2, Tabelle 1) mit der Fragestellung beschäftigte, ob Schüler/-innen die Bildvorlagen für die Modellierung selbst anfertigen können, konzentrierte sich der jüngste Projektdurchlauf (Durchlauf 3, Tabelle 1) auf die Integration in den Biologieunterricht.

### Ziele des Projektes

Die Alltags-, Lebens- und spätere Arbeitswelt der heutigen Schüler/-innen fordert digitale Kompetenzen mehr als je

zuvor. Dies macht die Adaption moderner Technologien in die Schulen notwendig. Als übergeordnetes Ziel soll daher im Zuge der fortschreitenden Digitalisierung und den damit einhergehenden Anforderungen an die Lernenden die Zukunftstechnologie 3D-Druck an die Schulen, respektive in den Unterricht gebracht werden. Für viele Lehrkräfte stellt sich jedoch die Frage nach der konkreten Umsetzung. Die Implementationsforschung hat gezeigt, dass Innovationen im Bildungsbereich so gestaltet sein müssen, dass sie möglichst leicht umzusetzen sind, einen Lernerfolg versprechen und sich Lehrkräfte als kompetent genug für die Umsetzung einschätzen ([5], S. 10). Einstiegshürden für Schulen sowie Lehrkräfte müssen demnach durch erprobte und didaktisch fundierte Unterrichtsmaterialien genommen werden. Auf Seite der Schüler/-innen gilt es, eine hohe Akzeptanz und Motivation beim Einsatz der neuen Technologien zu erzeugen. Ihr Interesse für diese Art technischer Anwendungen soll gesteigert werden.

Den Kern des fortlaufenden Projektes bildet dabei das Konzept für die Modellierung und den Druck von Blütenmodellen im Unterricht. Die Modelle werden ausgehend von realen Blütenvorlagen am Computer gestaltet (Abbildung 1). Das Unterrichtskonzept ist sukzessive erweitert sowie optimiert worden, um schließlich universell formuliert zu sein und von Lehrkräften auf die Blüten anderer Pflanzenarten übertragen werden zu können. Letztlich dient das Konzept sowohl als Leitfaden für eine 3D-Druck-AG als auch für Projekte im (Profil-)Unterricht. Es bietet genügend Variationsmöglichkeiten zur Anpassung an heterogene Lerngruppen, Klassengrößen und unterschiedliche Anforderungsniveaus sowie verschiedene Zeitpläne. Langfristig kann das Konzept die Grundlage für die sinnvolle Integration von 3D-Modellierung und 3D-Druck in den (Biologie-)Unterricht bilden. Da insbesondere im



**ABB. 1** Erstellung eines 3D-Modells der Vogelmiere ausgehend von einer realen Blütenvorlage. a) Die Bildvorlage einer Schülerin. b) Das fertig modellierte Objekt und c) das fertige Modell. Fotos: Karla Pilz (a) und Marcel Bonorden (b, c).

### IN KÜRZE

- Die **Digitalisierung von Schule und Unterricht** ist herausfordernd – für Lehrkräfte stellt sich oft die Frage, wie sie neue Technologien sinnvoll in ihren Unterricht integrieren können.
- Ein Modellprojekt zeigt, wie innovativer Biologieunterricht **computergestützte Modellierung und 3D-Druck** mit curricularen Lerninhalten verbinden kann.

naturwissenschaftlichen Unterricht Modelle zur Visualisierung des Lernobjektes eingesetzt werden können, schlägt das selbstständige Modellieren eine Brücke zwischen Technologie und curricularen Lerninhalten. Das Anfertigen eigener Anschauungsmaterialien fördert nicht nur das fachliche Verständnis, sondern könnte sich ebenso positiv auf die Modellkompetenz auswirken. Darüber hinaus sind eigens angefertigte Modelle perfekt auf die Bedürfnisse des Unterrichts zugeschnitten.

Um die Lehrkräfte zu entlasten und den Einstieg in das Programm zu erleichtern, werden Schulungen angeboten, die den kompetenten Umgang mit dem Modellierungsprogramm *Blender* (Blender Online Community 2020, Version 2.82) vermitteln. Auf diese Weise wird die Einstiegshürde für das Lehrpersonal verringert. Die Beherrschung eines Modellierungsprogrammes soll den Schüler/-innen den Zugang zur zukünftigen Nutzung von CAD-Programmen erleichtern. Das räumliche Vorstellungsvermögen am Computer soll gefördert werden, während die Schüler/-innen spielerisch ihre botanischen Fachkenntnisse schulen. Dabei müssen sie Ordnungsprinzipien vom Zusammenwirken einzelner Blütenorgane entwickeln, was auch im Zusammenhang mit Regeln und Prinzipien zur Bestimmung von Blüten relevant ist. Die 3D-Drucktechnik in Kombination mit Modellierung stellt einen besonderen methodischen Zugang zur Vorstellungsbildung dar und bietet die Möglichkeit, unterschiedliche Formen von Anschaulichkeit zu erreichen. Die fertigen Modelle sind zudem leicht zu modifizieren sowie zu reproduzieren und weisen in dieser Hinsicht einen Vorteil gegenüber gekauften oder gebastelten Modellen auf.



**ABB. 2** Die Prozessabläufe im adaptierten Unterrichtskonzept. Abb.: Tim Brederecke.

## Ablauf des Projekts

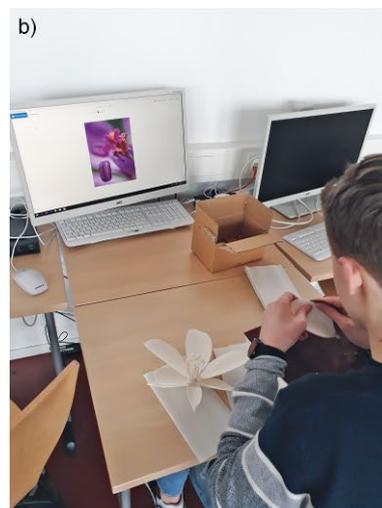
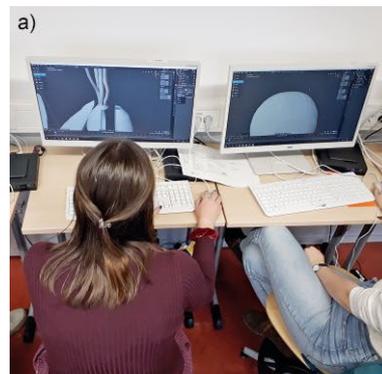
Wie bereits in einer Masterarbeit festgestellt, eignet sich das entwickelte Unterrichtskonzept zum Thema „3D-Druck von Blütenmodellen“ innerhalb einer AG zum Aufbau von fachlichen Kompetenzen ([1], S. 312). In einer sich anschließenden weiteren Masterarbeit sollte Problemen begegnet werden, indem das Konzept durch die Umsetzung in drei weiteren Lerngruppen tiefgreifender ausgearbeitet, an die universellere Modellierung verschiedener Pflanzenarten angepasst und der Lernerfolg wissenschaftlich ausgewertet wird. Das so erprobte und verbesserte Unterrichtskonzept konnte schließlich erfolgreich in den Unterricht einer 9. Klasse (31 Schüler/-innen) mit naturwissenschaftlichem Profil übertragen werden. Zusätzlich sollen Erfahrungen aus anderen Forschungsprozessen bei der Überarbeitung der Konzeption mit berücksichtigt werden.

Die ursprünglich an einer Schule durchgeführte Pilotierung von Februar bis Mai 2019 ([1], S. 313) lieferte erste Anhaltspunkte für den Zuwachs von botanischem und technischem Fachwissen. Wie bereits in einem ersten Artikel geschildert wurde [1], war jedoch die statistische Übertragbarkeit der Evaluationsergebnisse wegen der geringen Stichprobengröße sehr klein. Für die Arbeitsgemeinschaft konnten nach der Pilotierung zwei weitere Kooperationsschulen gewonnen werden, so dass sie an drei verschiedenen Schulen mit insgesamt 23 Schüler/-innen durchgeführt wurde. Die Gesamtschule und die beiden Gymnasien aus dem Raum Hannover boten in Bezug auf Gruppengröße, Ausstattung und individuelle schulische Interessen (die Lieblingsfächer wurden über einen Fragebogen erhoben) unterschiedliche Voraussetzungen, die angepasstes Handeln erforderten. Für die Interpretation der Ergebnisse sind dabei besonders die Gruppengröße, das durchschnittliche Alter sowie die Ausstattung der Computerräume relevant. Die grundlegenden Abläufe (Abbildung 2) in den Arbeitsgemeinschaften folgten dem vorliegenden Unterrichtskonzept für die digitale Blütenmodellierung in elf Doppelstunden. Die Erfahrungen aus der Durchführung mit sich unterscheidenden Lerngruppen wurden genutzt, um das Konzept anzupassen. Im Vergleich zum ursprünglichen Konzept wurde es durch die Anforderungen der Durchführung in den drei Lerngruppen der AGs dahingehend ausgearbeitet, dass das Modellieren von Blüten verschiedenster Pflanzenarten ermöglicht wird. So können die Inhalte von der Lehrkraft an die Gegebenheiten der Jahreszeit und damit der Verfügbarkeit von Blüten, an der Schule und der Schüler/-innen angepasst werden. In Abgrenzung zum ursprünglichen Konzept kann durch die Erweiterung des eigenen Bestimmens und Fotografierens der Blüten eine engere Verknüpfung zwischen der realen Pflanze und dem Modell hergestellt werden.

Der bislang wichtigste Schritt war die Ausweitung des Projektes von AGs auf den Biologieunterricht. Erstmals konnte in einem Zeitraum von zehn Wochen mit einer ganzen Schulklasse (n = 31) modelliert und gedruckt wer-

den. Dafür standen zehn Doppelstunden des vom regulären Biologieunterricht unabhängigen naturwissenschaftlichen (NW) Profilunterrichts der 9. NW-Klasse zur Verfügung, also weniger Zeit als für die Durchführung in den Arbeitsgemeinschaften. Auch war die Lerngruppe wesentlich größer. Da der Betreuungsaufwand ohnehin schon in kleineren Gruppen relativ hoch ist, musste die Sozialform zu einer Gruppenarbeit geändert werden. In jeder dieser Gruppen war ein Mitglied für die Modellierung eines einzelnen Blütenorgans verantwortlich. Die Struktur der Blüte wurde im Vorfeld fachlich geklärt. Mit den fertigen Blütenorganen der anderen Gruppenmitglieder konnte jede/r Schüler/-in ein eigenes individuelles Blütenmodell im Programm zusammensetzen. Da alle Gruppen die Blüte derselben Pflanzenart modellierten, konnten sich Schüler/-innen aus unterschiedlichen Gruppen mit demselben Blütenorgan bei Problemen helfen, indem sie die zielführenden Schritte der Modellierung besprachen. Darüber hinaus wurden Hilfestellungen zum Modellieren in Form von kurzen Videos und bebilderten Anleitungen mit Hinweisen sowie Materialien zur Problemanalyse bei Fehlern entwickelt. So konnte gewährleistet werden, dass das Vorgehen im Projektunterricht den Prozessabläufen im Unterrichtskonzept folgt.

Zu Beginn erarbeiten sich die Lernenden die Funktionsweise von 3D-Druckern und die für den erfolgreichen Druck notwendigen Arbeitsschritte. Anschließend wird der botanische Wissensstand abgefragt und nun durch die Erstellung eigener Nahaufnahmen mit Handy und Linsenaufsatz von Blüten verschiedener Pflanzenarten ein detailgetreues zweidimensionales Abbild von Strukturen und der Lage von Blütenorganen zueinander geschaffen (eine Doppelstunde). Dieser erste Schritt im Prozessablauf ist eine wichtige Neuerung im überarbeiteten Unterrichtskonzept. Daran knüpft eine Einführung in das Programm *Blender* an (zwei Doppelstunden). Hierfür wurden die Texturen im Programm so gestaltet, dass sie dem bekannten Videospiel *Minecraft* (Mojang AB 2011,



**ABB. 3** Schüler/-innen einer AG beim Modellieren (a), Schleifen (b) und Bemalen (c). Fotos: Anja Riemen-schneider (a, b), Marcel Bonorden (c).

Version 1.7) entsprechen. So kann an die Lebenswelt der Schüler/-innen angeknüpft und das Programm auf spielerische Weise erkundet werden. Sobald die grundlegenden Funktionen beherrscht werden, kann mit der Modellierung der Blüten begonnen werden (drei Doppelstunden). Für die Fehlerbehebung, letzte Anpassungen und das Slicing (Datei in ein druckfähiges Format überführen) ist im Unterrichtskonzept noch eine Doppelstunde als Puffer vorgesehen. Die Nachbearbeitung der Modelle erfolgt in zwei Doppelstunden und die Einheit schließt mit einer Modellkritik (eine Doppelstunde).

Die Modelle sollen so konzipiert sein, dass sie aus Einzelteilen zusammengesetzt werden können. Je nach Zeitrahmen können alle Teile entweder in Einzel-, Partner- oder Gruppenarbeit entstehen. Vorteilhaft ist dabei, dass bereits sehr früh im Verlauf des Unterrichts Blütenbestandteile gedruckt werden und die Schüler/-innen ihre Ergebnisse hautnah erleben können. Die fertig modellierten Objekte müssen vor dem Druck noch sorgfältig durch die Lehrkraft auf Fehlerquellen untersucht werden: Ist das sogenannte *Mesh* – in der Computergraphik bezeichnend für ein Polygonnetz zur Modellierung von 3D-Objekten – defekt oder unvollständig, kann dies beim späteren Ausdrucken zu Komplikationen bis hin zum Abbruch des Druckes führen. Auch das ist ein wichtiger Lernprozess. Die fertig überprüfte Modelldatei wird mit einem Slicing-Programm in ein für 3D-Drucker lesbares Dateiformat umgewandelt. Hier können auch letzte Skalierungen der Modellgröße und wichtige Einstellungen für den Ablauf des Druckes vorgenommen werden. Letztere sind essentiell, um technischen Problemen beim Druckprozess vorzubeugen.

Der Druck eines großen Blütenmodells kann je nach Einstellungen teilweise mehr als 48 Stunden dauern. Da der verfügbare Platz im Druckraum des 3D-Druckers begrenzt ist, werden die Blüten nacheinander in Einzelteilen gedruckt, um die maximal mögliche Modellgröße zu gewährleisten. In einem ersten Druckprozess werden dabei die Kronblätter

Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite 87 erklärt.

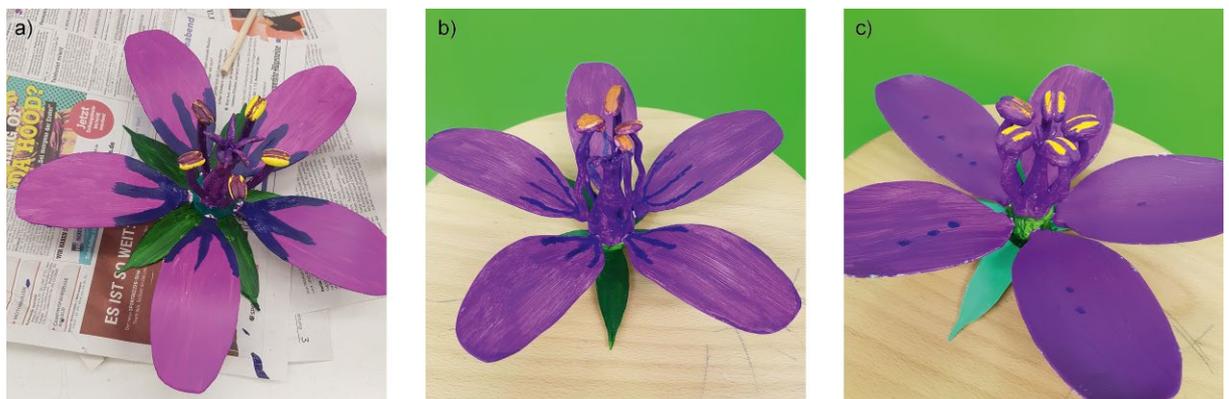
gedruckt, die viel Platz auf der Druckplatte einnehmen. Anschließend wird der Rest der Blüte in einem zweiten Druckprozess gedruckt. Das gedruckte Modell muss in den letzten Stunden noch nachbearbeitet werden, um beispielsweise Hilfs- und Stützstrukturen zu entfernen. Erst dann kann das Modell von den Schüler/-innen geschliffen und abschließend mit Acrylfarben naturgetreu oder kreativ bemalt werden. In Abbildung 3 sind Schüler/-innen beim selbstständigen Arbeiten in verschiedenen Phasen gezeigt. Die Unterrichtseinheit schließt mit einer Evaluation ab, um die mit der Kurzskaala *Intrinsische Motivation* nach Wilde et al. [6] ermittelte intrinsische Motivation sowie durch ergänzte Items Verbesserungsvorschläge der Teilnehmenden zu erfassen (22 Items).

Die gesammelten Erkenntnisse aus der praktischen Durchführung dienen als Grundlage für Anpassungen am Unterrichtskonzept. Während der ersten Pilotierung (Durchlauf 1) folgte das Konzept einem stark vorstrukturierten und auf Anleitung seitens der Lehrkraft beruhendem Ansatz. Mit der Überführung von der Arbeitsgemeinschaft in den Unterricht ist das Konzept so formuliert, dass die Lernenden so selbstständig wie möglich arbeiten. Auch die Arbeit in Gruppen wird ermöglicht, indem Schüler/-innen innerhalb ihrer Gruppe jeweils ein Blütenorgan modellieren und dieses später zu einem eigenen Modell zusammensetzen. Die Lehrkraft nimmt dabei eine beratende und unterstützende Rolle ein. Die Veränderungen werden durch den Bezug auf aktuelle didaktische Konzeptionen legitimiert. So wird auf die ► *Heterogenität* in den Lerngruppen durch ► *binnendifferenzierte* Lernangebote eingegangen: Schüler/-innen, die über einen Leistungsvorsprung verfügen, unterstützen ihre Mitschüler/-innen bei der Modellierung. Außerdem sind sie bei der Entwicklung neuer Möglichkeiten zur Modellierung von Blütenbestandteilen stark eingebunden. Der Ansatz, die Kompetenz der Schüler/-innen zu nutzen und Autonomie zu ermöglichen, ist im Sinne der Selbstbestimmungstheorie sowohl für die extrinsische als auch die intrinsische Motivation relevant ([7], S. 229).

Sehr weit fortgeschrittene Schüler/-innen haben die Möglichkeit, unabhängig von der Gruppe, ihr eigenes Modell zu erstellen. Auch bei der Komplexität der Modelle sind keine Grenzen gesetzt, so dass der Schwierigkeitsgrad problemlos an die Fähigkeiten der einzelnen Schüler/-innen angepasst werden kann. Um diese möglichst selbstbestimmt arbeiten zu lassen, ist der Unterricht ► *problemorientiert* aufgebaut: Zu Beginn jeder Stunde, in der modelliert wird (drei bis vier Doppelstunden), sollen die Teilnehmenden eigene Modellierungswege zu neuen Blütenbestandteilen ausprobieren, sich darüber austauschen und gemeinsam das weitere Vorgehen abstimmen. Gegebenenfalls erfolgt daran anknüpfend noch eine genauere Instruktion der Lehrkraft. Dass durch diese Vorgehensweise besonders zu Beginn der zweiten AG-Durchläufe häufig Fehler auftraten und zugelassen wurden, diente als Lernchance. Die Schüler/-innen sollten ihre Fehler selbst bemerken und sich nach Identifikation der Fehlerquelle mit ihren Mitschüler/-innen über diese austauschen, um einen Lösungsweg zu erarbeiten.

### Ergebnisse des Projektes

In allen AG-Lerngruppen haben die Schüler/-innen unterschiedlichen Alters (12 bis 16 Jahre) erfolgreich ihr eigenes Blütenmodell entwickelt, während in der NW-Klasse alle Teilnehmenden ein individuelles Modell mithilfe der Blütenorgane der anderen Gruppenmitglieder erstellten. Einige davon sind in Abbildung 4 dargestellt. Darüber hinaus wurde mittels eines Prä-Posttest-Designs ein Zuwachs botanischen Fachwissens von durchschnittlich 1,33 (s = 0,98) auf 5,42 (s = 1,99) von 13 möglichen Punkten im ersten Durchgang ([8], S. 82) und von 3,44 (s = 2,65) auf 7,65 (s = 1,87) im zweiten Durchgang gemessen (Tabelle 1). Prä- und Posttest wurden in der ersten, beziehungsweise in der letzten Unterrichtsstunde durchgeführt. Der Fragebogen umfasste acht Items zur Struktur der Blüte und fünf Items zu den Funktionen der Blütenorgane. Die Schüler/-innen der Arbeitsgemeinschaften des zweiten Durchlaufs (n = 17) konnten die Struktur der



**ABB. 4** Von Schüler/-innen modellierte, gedruckte und bemalte Blüten nach Fotovorlage des Gewöhnlichen Reiherschnabels (*Erodium cicutarium*). Fotos: Marcel Bonorden.

Blüten deutlich besser als die Funktionen der einzelnen Blütenbestandteile benennen. Während die Items im Aufgabenteil zur Blütenstruktur zu 76,5 Prozent (6,12 von 8 Punkten;  $s = 1,29$ ) korrekt beantwortet wurden, waren es im Aufgabenteil zur Funktion lediglich 30,6 Prozent (1,53 von 5 Punkten;  $s = 0,84$ ). Aus diesen Ergebnissen ergaben sich Modifikationen des Unterrichtskonzeptes.

Die Ergebnisse aus den beiden AG-Durchläufen (Pilotierung und Ausweitung auf drei Lerngruppen) spielten bei der Überführung in den Projektunterricht und der damit verbundenen Umgestaltung des Unterrichtskonzeptes eine tragende Rolle. Die Auswertung der Prä- und Posttests im jüngsten Projektunterricht ( $n = 31$ ) ergab sowohl im Zusammenhang mit Struktur- (Zuwachs von 3,5;  $s = 1,74$  auf 7,6;  $s = 0,51$  von 8 Punkten) und Funktionsbeziehungen (Zuwachs von 0,3;  $s = 0,42$  auf 3,13;  $s = 0,88$  von 5 Punkten) als auch insgesamt wesentlich höhere Punktzahlen - trotz einer größeren Lerngruppe. So konnte ein Zuwachs botanischen Fachwissens von 3,77 ( $s = 1,85$ ) auf 10,73 ( $s = 1,25$ ) von 13 Punkten gemessen werden (vgl. Tabelle 1). Bei der Frage, ob die Schüler/-innen die Tätigkeit im zweiten AG-Durchlauf als selbstbestimmt empfanden, kam es zwischen den Gruppen der einzelnen Schulen zu deutlichen Unterschieden (Tabelle 2): Während die Gruppen 1 ( $n = 4$ ; 3,25;  $s = 0,5$ ) und 3 ( $n = 9$ ; 3;  $s = 0,82$ ) mithilfe einer fünfstufigen Likert-Skala (0 = stimmt gar nicht; 1 = stimmt wenig; 2 = stimmt teils-teils; 3 = stimmt ziemlich; 4 = stimmt völlig) angaben, die Tätigkeit selbst steuern zu können (stimmt ziemlich), signalisierte die zweite Gruppe ( $n = 4$ ; 1,89;  $s = 1,27$ ) weniger (stimmt teils-teils) Selbstbestimmtheit beim Arbeiten (vgl. Tabelle 2). Die Schüler/-innen der dritten Gruppe stimmten der Aussage, dass sie während der AG stets Hilfe bekommen konnten, durchschnittlich völlig (3,78;  $s = 0,44$ ) zu, was sich mit dem Gesamtdurchschnitt deckt (3,88;  $s = 0,33$ ). Insgesamt wurde der zweite AG-Durchlauf durchschnittlich mit der Note 1,4 ( $s = 0,7$ ) bewertet. Da im Zuge der COVID-19-Pandemie zu Homeschooling übergegangen werden musste, wurde in der NW-Lerngruppe ( $n = 31$ ) noch keine Motivationsmessung durchgeführt.

### Diskussion und weitere Planung des Projektes

Das Unterrichtskonzept wurde nach der ersten Pilotierung in insgesamt vier Lerngruppen ( $n = 48$ ) vollständig erprobt. In den ersten drei Lerngruppen ( $n = 4$ ;  $n = 9$ ;  $n = 4$ ) wurde das Unterrichtskonzept im Rahmen einer Arbeitsgemeinschaft angewandt. Der Projektdurchlauf in der NW-Lerngruppe ( $n = 31$ ) fand als Pflichtunterricht statt und unterschied sich somit in Bezug auf die Freiwilligkeit der Teilnahme. Während bei den Teilnehmenden der AG-Lerngruppen ( $n = 17$ ) davon auszugehen ist, dass diese das Angebot aus Interesse nutzten, mussten die Schüler/-innen der NW-Klasse verpflichtend daran teilnehmen. Hinzu kam, dass die Schüler/-innen der NW-Klasse von der Fachlehrkraft benotet wurden. In Hinblick auf

**TAB 1. ABFRAGE DES BOTANISCHEN FACHWISSENS DER DREI DURCHLÄUFE VON BLÜHENDE FANTASIE**

Durchlauf	Prätest (von 13)	Posttest (von 13)	Zuwachs
1 (Pilotierung in AG; $n = 6$ )	1,33 ( $s = 0,98$ )	5,42 ( $s = 1,99$ )	4,09
2 (2. Durchlauf gesamt; $n = 17$ )	3,44 ( $s = 2,65$ )	7,65 ( $s = 1,87$ )	4,21
2.1 (AG 1; $n = 4$ )	6,25 ( $s = 2,90$ )	10 ( $s = 1$ )	3,75
2.2 (AG 2; $n = 9$ )	1,67 ( $s = 1,5$ )	6,39 ( $s = 0,96$ )	4,72
2.3 (AG 3; $n = 4$ )	4,63 ( $s = 1,11$ )	8,13 ( $s = 1,65$ )	3,5
3 (NW-Lerngruppe)	3,77 ( $s = 1,85$ )	10,73 ( $s = 1,25$ )	6,96

motivationale Konzepte unterscheiden sich also die Ausgangsvoraussetzungen von AG-Lerngruppen und NW-Lerngruppe. Während bei den Teilnehmenden der Arbeitsgemeinschaften tendenziell ein intrinsisch motiviertes Handeln vermutet werden kann, muss bei der NW-Lerngruppe - ohne das individuelle Interesse einzelner Schüler/-innen an Modellierung und 3D-Druck zu kennen - angenommen werden, dass das Handeln eher extrinsisch motiviert war ([7], S. 225). Die Annahmen über die intrinsische Motivation der AG-Teilnehmenden werden dadurch gestützt, dass 13 von 17 Teilnehmenden der AG-Lerngruppen angaben, sich Zuhause eigenständig mit dem Programm beschäftigt zu haben.

Da auf Selbstbestimmung beruhende Lernmotivation positive Wirkungen auf die Qualität des Lernens hat ([7], S. 223), gilt es, im Unterrichtskonzept selbstbestimmtes Handeln zu ermöglichen. Dabei können nicht nur intrinsisch motivierte Verhaltensweisen, wie sie in den Arbeitsgemeinschaften anzunehmen sind, sondern auch bestimmte Formen extrinsisch motivierten Verhaltens als selbstbestimmt erlebt werden ([7], S. 223). In der Evaluation der Arbeitsgemeinschaften signalisierte die zweite und größte Gruppe ( $n = 9$ ; 1,89;  $s = 1,27$ ) weniger (stimmt teils-teils) Selbstbestimmtheit beim Arbeiten als die beiden kleineren Gruppen ( $n = 4$ ; 3,25;  $s = 0,5$ ; stimmt ziemlich und  $n = 4$ ; 3;  $s = 0,82$ ; stimmt ziemlich). Dieses Ergebnis könnte insofern mit der Gruppengröße von neun Schüler/-innen korrelieren, als sie aufgrund der schwierigeren Betreuungssituation trotz gegenseitiger Unterstützung und einer großen Kreativität bei der Entwicklung neuer Modellierungswege dennoch häufig Anleitungen seitens der Lehrkraft bedurften. Für die wesentlich größere NW-Lerngruppe waren aus diesem Grund Anpassungen des Unterrichtskonzeptes notwendig, um mehr Selbstbestimmtheit zu ermöglichen. Die Blüten sollten nun im Rahmen einer Gruppenarbeit modelliert werden. Die Schüler/-innen in den Gruppen hatten so für die Modellierung ihres jeweiligen Blütenorgans mehr Zeit zur Verfügung, um zielführende Wege selbst zu erproben. Durch die Gruppenarbeit schlossen sich die Schüler/-innen im Sinne einer Ko-Konstruktion projektartig zusammen, so dass Überlegungen, Planungen, der Austausch über Konstruktionsprozesse und letztendlich das Zusammensetzen der Blüte mit

**TAB 2. ZENTRALE EVALUATIONSERGEBNISSE AUS DEN BEIDEN AG-DURCHLÄUFEN**

	1. Durchlauf (n = 6)	2. Durchlauf Gruppe 1 (n = 4)	2. Durchlauf Gruppe 2 (n = 9)	2. Durchlauf Gruppe 3 (n = 4)
Die Tätigkeit hat mir Spaß gemacht	3,67 (s = 0,52) (stimmt völlig)	3,25 (s = 0,5) (stimmt ziemlich)	3,67 (s = 0,71) (stimmt völlig)	4 (s = 0) (stimmt völlig)
Ich konnte die Tätigkeit selbst steuern	2,5 (s = 0,55) (stimmt ziemlich)	3,25 (s = 0,5) (stimmt ziemlich)	1,89 (s = 1,27) (stimmt teils-teils)	3 (s = 0,82) (stimmt ziemlich)
Interesse an erneuter AG-Teilnahme	3,83 (s = 0,41) (stimmt völlig)	3,13 (s = 0,85) (stimmt ziemlich)	3,11 (s = 1,05) (stimmt ziemlich)	4 (s = 0) (stimmt völlig)
Ich hatte immer das Gefühl, Hilfe zu bekommen	–	4 (s = 0) (stimmt völlig)	3,78 (s = 0,44) (stimmt völlig)	4 (s = 0) (stimmt völlig)
Ich habe mich Zuhause mit <i>Blender</i> beschäftigt	–	2 von 4	8 von 9	3 von 4
Ich empfand das Arbeitsumfeld als angenehm	–	3,25 (s = 0,96) (stimmt ziemlich)	3,44 (s = 0,73) (stimmt ziemlich)	2,75 (s = 0,96) (stimmt ziemlich)
Note	1,5 (s = 0,55)	1,6 (s = 0,48)	1,6 (s = 0,88)	1 (s = 0)

Unterstützung der Lehrkraft gemeinsam erfolgen (vgl. [9]). Bei der Modellierungsarbeit konnten die Schüler/-innen auf zahlreiche Hilfsmaterialien wie Videos und bilderte Anleitungen zu Funktionen und komplizierteren Operationen im Programm zugreifen. Ein großer Teil der Materialien wurde für das pandemiebedingte Homeschooling konzipiert, erwies sich jedoch auch im Präsenzunterricht als förderlich für das selbstständige Arbeiten. Gleichzeitig war die NW-Lerngruppe (14–18 Jahre) im Durchschnitt etwas älter als die AG-Lerngruppe (12–16 Jahre), was ebenfalls beim Anteil der im Unterrichtskonzept vorgesehenen freien Modellierung berücksichtigt wurde.

Die Ergebnisse der Studie zeigen einen Zuwachs von botanischem Fachwissen. Da aus den Ergebnissen des zweiten AG-Durchlaufs hervorging, dass die Schüler/-innen die Strukturen der Blüte (76,5% der Items) besser als die Funktionen (30,6% der Items) beherrschen, ergab sich die Notwendigkeit, das Verständnis der Beziehung von Struktur und Funktion besser zu fördern. So wurde das Unterrichtskonzept dahingehend überarbeitet, die Schüler/-innen beim Anfertigen von Bildvorlagen durch gezielte Impulse für die Funktionen der Blütenbestandteile zu sensibilisieren. Konkret kann beispielsweise an den Staubbeutel Pollen beobachtet und im Fruchtknoten die Samenanlage entdeckt werden, so dass die Verknüpfung von Struktur und Funktion schon in den frühen Phasen des Projektes hergestellt wird.

Die dargestellten Ergebnisse aus der NW-Lerngruppe könnten den Erfolg dieser Modifikation indizieren, da hier die Strukturen der Blüte (95,1% der Items) und die Funktionen der Blüte (62,5% der Items) besser als im zweiten AG-Durchlauf benannt wurden. Hier müssen allerdings auch Aspekte wie das höhere Alter der Teilnehmenden und die Benotung der Mitarbeit durch die Fachlehrkraft (die Testergebnisse flossen nicht in die Benotung ein) berücksichtigt werden. Obwohl der prozentuale Anteil der durchschnittlich korrekt beantworteten Items im Bereich

Funktion deutlich höher als zuvor liegt, besteht hier dennoch eine große Differenz zum Bereich Struktur. Daraus lässt sich ebenfalls ableiten, dass das Unterrichtskonzept zukünftig noch mehr auf diese Problemstellung hin weiterentwickelt werden muss. Der Zusammenhang zwischen Struktur und Funktion muss nicht nur beim Anfertigen der Bildvorlagen, sondern auch in anderen Projektphasen wie dem Modellieren, dem Druck, der Nachbearbeitung und der Modellkritik hergestellt werden. Insgesamt unterstreichen die Ergebnisse die Wirksamkeit des Unterrichtskonzeptes. Im Vergleich mit anderen Interventionen zur Förderung botanischen Fachwissens (z. B. [2], S. 15) konnten die Teilnehmenden die Blütenorgane sehr gut benennen, was mit der intensiveren und längeren Beschäftigung mit den Strukturen zusammenhängen könnte.

Auch hinsichtlich der Testverfahren existiert noch Optimierungsbedarf. Um das botanische Fachwissen genauer zu ermitteln, sind detailliertere Fragebögen mit einer höheren Zahl von Items notwendig. Außerdem müsste der Lernerfolg mit dem einer regulären Botanikeinheit verglichen werden, um die Effektivität der Modellierungseinheit deutlicher herauszuarbeiten. Über die Förderung der Modellkompetenz können bisher nur Annahmen geäußert werden. Dieser Aspekt scheint einen Mehrwert des Projektunterrichts gegenüber regulären Unterrichtsmethoden darzustellen, wird jedoch bisher nicht erhoben. Um die intensivere Auseinandersetzung mit den Modellen von der Planung über die Modellierung bis zur Modellkritik wissenschaftlich zu verifizieren, werden dahingehende Messungen in der weiteren Projektplanung essentiell sein. Auch die Wahl des Programms *Blender* für die Modellierung bleibt zu diskutieren. Zwar bietet die Software mit ihren zahlreichen Funktionen viel Freiraum für Kreativität, schränkt andererseits aber gerade zu Beginn des Projektes durch ihre Komplexität ein und fordert eine umfangreiche Einführung. So hatten die Teilnehmenden häufig eine genaue Vorstellung, wie sie einen

Blütenbestandteil modellieren wollten, wussten allerdings nicht, wie diese im Programm umzusetzen ist.

Allerdings sorgt die explorative Vorgehensweise auch für eine tiefgreifende Beschäftigung mit der Software und stellt für die Schüler/-innen eine Herausforderung bei der Modellplanung dar: Verschiedene Funktionen müssen ausprobiert werden, Pläne verworfen oder neu gestaltet werden. Gleichwohl stellt die damit verbundene Länge der Unterrichtseinheit für den unterrichtspraktischen Nutzen insofern eine Hürde dar, als das Projekt mit zehn Doppelstunden kaum in den regulären Biologieunterricht eingebettet werden kann und die Durchführung für Lehrkräfte mit einer relativ hohen Einarbeitungszeit verbunden ist. Aus diesem Grund werden in Zukunft Schulungen für Lehrkräfte zu kürzeren Unterrichtseinheiten angeboten. Die Unterrichtsmaterialien und -konzepte sollen anschließend von den teilnehmenden Lehrkräften erprobt und hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit im Unterricht evaluiert werden. Beispielsweise existiert bereits ein Entwurf für die Modellierung verschiedener menschlicher Gelenktypen im Umfang von zwei bis drei Unterrichtseinheiten [10]. Auch andere biologische Fragestellungen wie beispielsweise der Druck von Zähnen früherer Hominidae oder von Organen sind im schulischen Rahmen denkbar. Dabei wäre es stets sinnvoll, curricular vorgesehene Lerninhalte zu behandeln.

Letztlich lässt sich das Konzept eines Projektunterrichtes oder einer 3D-Druck-AG auch auf andere Fachbereiche, insbesondere die MINT-Fächer, übertragen. Somit können in Zukunft alle Fachrichtungen von maßgeschneiderten, selbst angefertigten Modellen und Visualisierungen für den Unterricht profitieren.

## Zusammenfassung

Die Umsetzung der Digitalisierung von Schule und Unterricht ist mit Herausforderungen für Lehrkräfte verbunden.

Sie müssen die nötige technische Kompetenz aufweisen, um neue Technologien wie computergestützte Modellierung und 3D-Druck sinnvoll und gewinnbringend in ihren Unterricht integrieren können. Um Lehrkräfte zu entlasten, ist ein Angebot von didaktisch legitimierten und in der Praxis erprobten Unterrichtskonzepten notwendig. Eine wichtige Grundlage bei diesem Prozess bilden Modellprojekte für innovativen Biologieunterricht. Im Rahmen eines solchen Projektes wurden von Schüler/-innen Blütenmodelle ausgehend von realen Blüten erstellt. Der Lernerfolg wurde wissenschaftlich ausgewertet und ein dazugehöriges Unterrichtskonzept für Lehrkräfte weiterentwickelt. Die Studie konnte zeigen, dass sich der Projektunterricht positiv auf das botanische Fachwissen auswirkt.

## Summary

### Designing a competence-oriented teaching-learning arrangement for modeling flower models by means of 3D printing

Implementing the digitalization of schools and teaching involves challenges for teachers. They need the necessary technical expertise to be able to integrate new technologies such as computer-aided modeling and 3D printing into their lessons in a meaningful and profitable way. In order to support teachers, it is necessary to offer didactically legitimate teaching concepts that have been tested in practice. Model projects for innovative biology teaching form an important basis for this process. Within the framework of such a project, students create flower models based on real flowers. The learning success was evaluated and a corresponding teaching concept further developed. The study showed that project teaching has a positive effect on botanical knowledge.

## Schlagworte

Digitalisierung, Schule, 3D-Druck, Innovativer Unterricht, Botanik.

## Danksagung

Wir bedanken uns bei allen Institutionen, die an der Entstehung und Durchführung dieses Projektes mitgewirkt haben. Dazu zählen die Goetheschule Hannover, die Albert Einstein-Schule Laatzen und das Erich Kästner Gymnasium Laatzen. Weiterhin möchten wir uns bei der Joachim Herz Stiftung und der Stiftung NiedersachsenMetall für die Förderung der 3D-Druck-AG Blühende Fantasie durch die Anschaffung eines 3D-Druckers und von Druckmaterial bedanken.

## Supporting Information

Zu diesem Aufsatz haben wir unter [www.biuz.de](http://www.biuz.de) den Evaluationsbogen und ein Arbeitsblatt zum Blütenaufbau als zusätzliches Material bereitgestellt. Einfach den Artikel aufrufen und dort die Supporting Information öffnen. Das Material ist für Sie kostenfrei zugänglich.

## GLOSSAR

**Binnendifferenzierung:** Auch „innere Differenzierung“, bezeichnet alle Formen von Differenzierung innerhalb einer Lerngruppe, um Lernende individuell zu fördern. Damit ist Binnendifferenzierung eine didaktische Methode, um auf die Heterogenität in Lerngruppen einzugehen und Chancengleichheit zu schaffen ([11], S. 173).

**Heterogenität:** „Heterogenität meint in der Schule neben Unterschieden in Bezug auf etwa Geschlecht, Ethnizität, Milieu oder Behinderung auch lern- und leistungsbezogene Differenzen und lässt sich Jürgen Budde zufolge auch auf Bildungsungleichheiten beziehen.“ ([12])

**Problemorientierter Unterricht:** Unterricht, der von Problemen ausgeht und „seinen Verlauf als Problemlösungsprozess bestimmt [...]“ ([13], S. 247). Die Problemstellung „initiiert dabei den Lernprozess aus dem Kontext heraus und soll sowohl motivieren als auch herausfordern“ ([14], S. 65f).

## Literatur

- [1] K. Meinders, J. Papenbrock (2019). Digitale Bildung: Botanik mal anders! In: *Biologie in unserer Zeit*. 49/5, Wiley-VCH, Weinheim, 312–313.
- [2] L. Kissi, D. Dreesmann (2018). Plant visibility through mobile learning? Implementation and evaluation of an interactive Flower Hunt in a botanic garden, *Journal of Biological Education*, 52(4), 344–363.
- [3] D. Preece et al. (2013). „Let’s get Physical“: Advantages of a physical model over 3D computer models and textbooks in learning imaging anatomy. (Hrsg: American Association of Anatomists), 6, 216–224.
- [4] L. Louca, Z. Zacharia (2012). Modeling-based learning in science education: Cognitive, metacognitive, social, material and epistemological contributions, in: *Educational Review*, 64(4), 471–492.
- [5] C. Gräsel (2010). Stichwort: Transfer und Transferforschung im Bildungsbereich, in: *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, 13(1) Springer, Berlin, 7–20.
- [6] M. Wilde et. al. (2009). Überprüfung einer Kurzskaala intrinsischer Motivation (KIM), in: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, Jg. 15, Springer, Kiel und Berlin, 31–45.
- [7] E. Deci, R. Ryan (1993). Die Selbstbestimmungstheorie der Motivation und ihre Bedeutung für die Pädagogik, In: *Zeitschrift für Pädagogik* 39(2), 223–238.
- [8] K. Meinders (2019). Konzeption, Durchführung und Evaluation der 3D-Druck-AG Blühende Fantasie: 3D-Druck von Blütenmodellen am Gymnasium Goetheschule Hannover, Masterarbeit, Hannover.
- [9] W. Fthenakis (2015). Ko-Konstruktion: Lernen durch Zusammenarbeit (online), <https://aba-fachverband.info/ko-konstruktion-lernen-durch-zusammenarbeit/> (aufgerufen am 02.11.2021, 12:18)
- [10] B. Unger, M. Bonorden, J. Papenbrock (2021). Einsatz von 3D-Druck-Modellen und 3D-Modellierung im Biologie (NaWi)-Unterricht am Beispiel von Gelenktypen, in: *Naturwissenschaften digital: Toolbox für den Unterricht - Band 2*, Joachim Herz Stiftung, Hamburg.
- [11] W. Klafki, H. Stöcker (2007). Innere Differenzierung des Unterrichts. In: Wolfgang Klafki (Hrsg.): *Neue Studien zur Bildungstheorie und Didaktik* (Hrsg.: W. Klafki), Beltz, Weinheim und Basel.
- [12] <https://www.bpb.de/lernen/digitale-bildung/wekrstatt/266110/heterogenitaet-in-schule-und-unterricht> (aufgerufen am 29.07.2020, 16:20)
- [13] M. Bonsch (1981). Problemorientierter Unterricht, In: *Schweizer Schule. Zeitschrift für christliche Bildung und Erziehung* 68(7), Kalt-Zehnder, Zug, 246–252.
- [14] D. Brovelli, M. Wilhelm (2009). Problemorientiertes lernen für den integrierten Naturwissenschaftsunterricht, In: *Internetzeitschrift Physik und Didaktik in Schule und Hochschule* (Hrsg.: Fachverband Didaktik der Physik) 2(8), 65–72.

## Verfasst von:



*Marcel Bonorden hat an der Leibniz Universität Hannover studiert. Er hat seine Masterarbeit zur Umsetzung von 3D-Druck AGs verfasst. Seit 2020 promoviert er am Institut für Botanik der Leibniz Universität Hannover über das Thema computergestützte Modellierung und 3D-Druck im Unterricht.*



*Kai Meinders hat seinen Masterabschluss an der Leibniz Universität Hannover erlangt und widmete seine Bachelor- und Masterarbeit dem 3D-Druck von Blütenmodellen und dessen praktischer Anwendung in der Schule.*



*Sascha Offermann studierte an der RWTH-Aachen Biologie und promovierte dort 2008 über das Thema Epigenetik in Pflanzen. Danach forschte er als Postdoc an der Washington State University in den USA an neuartigen C4-Pflanzen. 2011 wechselte er als Juniorprofessor für Photosyntheseforschung an das Institut für Botanik der Leibniz Universität Hannover und arbeitet dort seit 2015 als permanenter Wissenschaftler.*



*Anja Riemenschneider hat in Hannover an der Universität Hannover Biologie studiert und 2006 promoviert. Nach der Postdoczeit an der Universität Bielefeld und der LUH Hannover und mehreren Lehrtätigkeiten an den Universitäten, erfolgte 2015 der Quereinstieg an das Gymnasium Goetheschule Hannover. Sie arbeitet seit 2020 als verbeamtete Lehrkraft und unterrichtet die Fächer Biologie, Chemie und Fächerübergreifende Naturwissenschaften.*



*Jutta Papenbrock hat in Bielefeld, Edinburgh/Schottland und Hamburg Biologie studiert. Anschließend war sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Pflanzengenetik und Kulturpflanzenforschung, Gatersleben, tätig. Nach Promotion und Habilitation hat sie zunächst ein Heisenberg-Stipendium, dann eine Heisenberg-Professur erhalten. Seit 2010 ist sie als Professorin am Institut für Botanik der LUH tätig und lehrt u. a. Botanik und Evolution für Studierende im Lehramt. Um Studierende noch mehr für Botanik zu begeistern, setzt sie verschiedene analoge und digitale Mittel ein.*

## Korrespondenz:

*Prof. Dr. Jutta Papenbrock  
Leibniz Universität Hannover  
Institut für Botanik  
Herrenhäuser Straße 2  
30419 Hannover  
E-Mail: [jutta.papenbrock@botanik.uni-hannover.de](mailto:jutta.papenbrock@botanik.uni-hannover.de)*

## ORNITHOLOGIE

## Vögel beobachten



Die Flugbegleiter sind eine kleine Gruppe von Journalisten, die für diverse Medien arbeiten, von der FAZ, GEO bis zum Deutschlandfunk und Schweizer

Rundfunk. Sie haben sich auf der Internet-Plattform „Riffreporter“ zusammengeschlossen, auf der sie seit 2018 regelmäßig Reportagen und kleinere Exposees darüber verfassen, was sich in der Welt der „Birder“, Naturschützer und Ornithologen so alles tut. Die gut lesbaren Kurzreportagen wurden zwischen 2018 und 2020 zuerst bei Riffreporter ([www.riffreporter.de](http://www.riffreporter.de)) publiziert. Die Artikel stammen aus den Federn bekannter Journalist/-innen wie J. Budde, C. Habermalz, M. Hofmann, T. Krumenacker, A. Preger, C. Riechelmann, J. Romberg, C. Ruby, C. Schwägerl und C.-A. von Treuenfels. Die ersten 11 Artikel im Teil „Beobachten und Staunen“ sind persönlich gehaltene Erlebnisberichte der Autoren, darüber wie sie eine seltene Vogelart beobachtet haben oder wie sie zur Naturbeobachtung gekommen sind. Die nächsten 11 Artikel in „Erforschen und Entdecken“ widmen sich aktuellen Themen der ornithologischen Forschung und Artenschutzprojekten. 18 Artikel im Teil „Gefahren erkennen, sich Sorgen machen“ beschreiben aktuelle Probleme in unserer Vogelwelt und Natur. Hier geht es um Bestandsrückgänge, Jagd, Vogelhandel, Neozoen, Klimawandel, aber auch um Artenschutzprogramme, die sich dem Erhalt von Bartgeier, Kiebitz, Seggenrohrsänger und Trauerseeschwalbe widmen.

Dieses Sachbuch ist spannend und leseleicht, aber dennoch sehr sachkundig geschrieben. 33 Vogelillustrationen von Paschalis Dougalis lockern die Texte auf. Die Einzelartikel sind von hoher Qualität. Diese

Sammlung ist eine ideale Lektüre, wenn man nur wenig Zeit hat und vielleicht einen Anreiz benötigt, am nächsten Wochenende doch mal wieder in die Natur zu ziehen, um Vögel zu beobachten.

*Michael Wink, Heidelberg*

**Die Flugbegleiter.**

Von einem Geier, der Frieden stiftet, Hightech-Störchen und andere Reportagen über Vögel und Menschen. Christian Schwägerl (Hrsg.), Franckh Kosmos Verlag, Stuttgart, 2020, 299 S., 20 €, ISBN 978-3-440-16972-8.

## NATURSCHUTZ

## Showdown für den Urhahn



Es geht zu Ende im Ländle mit dem größten unserer Waldhühner, dem Auerhuhn, dem „Urhahn“ der Gefiederten. Mit „Auer“ ist er im selben Sinne be-

nannt wie der Auerchse. Sein Aussterben steht nicht nur im Schwarzwald bevor, dem einst größten Mittelgebirgsvorkommen der Auerhühner in Europa, sondern weithin in ihrem riesigen Areal. Sogar im Ural und jenseits davon, in der Taiga Sibiriens, nehmen die Bestände ab. Peter Berthold, langjähriger Leiter der Vogelwarte Radolfzell und international renommierter Vogelforscher, begründet in seinem neuen Buch überzeugend, warum kaum noch Hoffnung besteht, dass ein überlebensfähiger Restbestand dieses „Urvogels“, wie er das Auerhuhn immer wieder nennt, im Schwarzwald erhalten bleibt. Ein weiteres Buch also zum Niedergang unserer Vogelwelt? Eines, in dem wir das ohnehin leidlich Bekannte wieder einmal serviert bekommen? Wäre dem so, lohnte keine ausführlichere Rezension in der

BiuZ. Bertholds Buch ist anders. Als Ergebnis von mehr als einem halben Jahrhundert eigener intensiver Auerhuhnforschung steckt es voller Befunde, die überraschen und biologisch faszinieren. Zudem ist es eine Autobiografie, die den Vogelzugforscher persönlich weit stärker charakterisiert als sein Buch „Mein Leben für die Vögel“. Natürlich bekam er bei seinen Forschungen jede Menge Konflikte mit Jägern, Förstern und Forstverwaltungen. Nicht nur, weil er Nächte im Schlafsack an entlegenen Stellen im Wald verbrachte, sondern auch weil der Auerhahn immer noch wie in Feudalzeiten von ‚Hohen Herren‘ beansprucht wird. Erheiternsdes dazu berichtet er vielfach und macht damit das Buch zu einem Lesevergnügen. So hängt eine kuriose Missdeutung von ‚Hahnenjägern‘ mit seiner zunächst verblüffenden Formulierung zusammen, dass „Auerhühner sozusagen die Pferde unter den Vögeln sind“. Pferde? Gemeint ist nicht der gälische, als Capercaillie ins Englische übernommene und damit international bekannt gewordene Trivialname, der ‚Ritter des Waldes‘ bedeutete. Es ist die Verdauung, auf die sich die Anmerkung bezieht. Die Auerhühner bearbeiten ihre Nahrung, die im Winter höchst einseitig aus (Moor)Kiefern- und Fichtennadeln besteht, mit Blinddarmfermentierung und ähneln damit den Pferden und übrigens noch mehr den Bibern und Kaninchen. Eines der wichtigsten Ergebnisse der Auerhuhnforschung an der Vogelwarte Radolfzell war die Feststellung, dass es am bakteriellen Mikrobiom in den Blinddärmen liegt, ob Auerhühner durch den Winter kommen, wenn sie von Koniferennadeln leben, oder verhungern, weil das Bakterienensemble nicht stimmt und der Nahrungsgrad zu gering wird. Daran scheiterten die rund zehntausend zur Bestandsstützung oder zur Wiedereinbürgerung ausgesetzten Auerhühner, die in Volieren aufgezogen worden waren und sich in physisch guter Verfassung befunden hatten. Es mangelte ihnen an den physiologisch

wichtigen Mikroben, wie *Megasphaera* und *Megamonas*, während pathogene *Pseudomonas*-Bakterien (zu) stark vertreten waren. Die Auerhühner setzen wie die Kaninchen einen speziellen Blinddarmkot ab, aus dem sich die Küken mit den richtigen Mikroben versorgen. In hochherrschaftlichen Jagdkreisen hielt man den Blinddarmkot, den man auf Schnee an den Balzplätzen fand und „Falzpech“ nannte, für eine spermahaltige Balzabsonderung (Falz = Balz). Sie wurde zur Steigerung der eigenen Potenz genossen. Berthold meint dazu, da hätte Hühnermist mehr bewirkt, weil die Hähne auf dem Hühnerhof weit häufiger kopulieren als die Auerhähne.

Ein anderer, von den primär an den Hähnen und ihrem Abschuss interessierten Jägern nicht erkannter Forschungsbefund deckte die eigentliche Misere auf, in der inzwischen nahezu alle Auerhuhnbestände stecken: Die Fortpflanzungsrate fällt (viel) zu gering aus. Die Jungenzahlen sind zu niedrig, die Überlebensraten der Jungen zu schlecht. Das liegt am zu dicht gewordenen Bodenbewuchs in jenen Rand- und Übergangsbereichen, wo der Wald lichter ist – kein finsterner „Tann“ des bezeichnend so genannten Schwarz-Waldes – und Zwergsträucher wachsen und fruchten können. Die Waldränder im Übergangsbereich zu den offenen Hochmooren boten von Natur aus Habitatstrukturen, wie weichmoosige, niedrige und lückig-offene Bodenvegetation mit Beerensträuchern, die den kleinen Junghühnern Deckung bieten und dennoch ihr Umherlaufen bei der Nahrungssuche nicht behindern. Das ist vorbei. Die (Hoch)Moore wachsen zu. Längst hätten die Küken Buschmesser nötig, um durch das zu dichte Gestrüpp, das sich entwickelt hat, vorwärts zu kommen und Nahrung zu finden. Eine auerhuhnrechte Biotopgestaltung war versäumt worden. Nun gab es zwar in den guten alten Zeiten großer Auerhuhnbestände eine solche auch nicht, aber damals herrschten marginale Verhältnisse ohne die Dauer-

düngung aus der Luft mit Stickstoffverbindungen, die das Wachstum fördern. Berthold verweist immer wieder auf die zentrale Bedeutung dieser Biotopveränderungen, meistens aber an zweiter Stelle nach der Klimaerwärmung. Doch wäre diese der Hauptfaktor, müsste man sich um die Auerhühner in unseren Mittelgebirgen nicht sorgen, denn als Art besiedelt das Urhuhn, wie es in seinem Artnamen *Tetrao urogallus* genannt wird, viel mildere Regionen, wie das Kantabrische Gebirge, und es überlebte auch die warmen Jahrhunderte des Mittelalters. Es ist die geringe Wüchsigkeit des Taigabodens, der dem Auerhuhn und anderen bodenbewohnenden Waldvögeln günstige Lebensbedingungen bietet. Bei uns setzte der große, offenbar nicht (mehr) aufzuhaltende Niedergang mit der Überdüngung über die Massenzufuhr von Stickstoffverbindungen auf dem Luftweg ein. Peter Berthold kann daher nur im hinreichend großflächigen Ausmagern (staatsforstlicher) Waldgebiete letzte Chancen für die Erhaltung des Auerhuhns sehen, vorausgesetzt der massiv störende Tourismus ließe sich daraus fernhalten und die forstliche Waldnutzung entsprechend gestalten. Nachdem dies trotz „Grüner“ Landesregierung in Baden-Württemberg gescheitert ist, wird das Aussterben des „Urhuhns“ nicht mehr zu verhindern sein. Verständlich, dass Bertholds Groll in seinen Formulierungen mitunter recht drastisch ausfällt. So ist sein Buch Lesegenuss und erschütternd zugleich. Denn es sagt in aller Deutlichkeit auch, wie wenig Wert solide wissenschaftliche Arbeit hat, wenn ihre Befunde mit Partikularinteressen von Wirtschaft und Bevölkerung kollidieren.

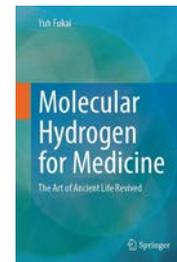
*Josef H. Reichbolf, München*

#### **Auerhuhn.**

Ein Urvogel verschwindet. Peter Berthold, Kosmos Verlag, Stuttgart, 2021, 288 S., 22 1, ISBN 978-3-4401-7266-7.

## MEDIZIN

### Wasserstoff als Medikament



Die therapeutische Anwendung von molekularem Wasserstoff, also dem Gas H<sub>2</sub>, ist in Europa in der Öffentlichkeit, aber auch in der Ärzteschaft weitgehend unbekannt. Seit einer bahnbrechenden Veröffentlichung von Ohsawa et al. aus dem Jahr 2007 (Nat. Med. 13: 688–694) ist die Anwendung von Wasserstoff Gegenstand seriöser Forschung bei zahlreichen Erkrankungen. Seither sind mehr als 700 *peer reviewed* Fachartikel und etliche klinische Studien veröffentlicht worden. Die Arbeiten stammen überwiegend aus Japan und China, ferner aus den USA und Korea und nur vereinzelt aus anderen Ländern.

Das Buch „Molecular Hydrogen for Medicine“ ist in zwei Teile unterteilt, wobei der zweite Teil die Entstehung des Lebens beleuchtet und hier nicht weiter besprochen wird. Der Aufbau des Buches ist klar strukturiert. Zunächst werden die Anfänge der medizinischen Wasserstoffforschung beleuchtet. Das zweite und wichtigste Kapitel beschreibt einzelne Studien, in denen Wasserstoff präventiv oder therapeutisch erfolgreich angewendet wurde. Die exemplarisch und detailliert besprochenen Anwendungen umfassen Fatigue, M. Alzheimer und M. Parkinson, Schlaganfall, rheumatische Arthritis, Blutdialyse, Gewebeschäden durch Bestrahlung, Sepsis und COVID-19-bedingte Lungenentzündung. Tabellarisch aufgelistet werden 15 bisher erfolgte klinische Studien zu Wasserstoff am Menschen (Stand 2017). Dass ein einzelner Wirkstoff bei derart vielen und sehr unterschiedlichen Erkrankungen Besserung bringt, verwundert zu-

nächst und macht skeptisch. Aufklärung erfolgt in Kapitel 4, in dem die physiologischen Wirkungen von Wasserstoff beschrieben werden. Die Aufnahme von Wasserstoff bewirkt die Aktivierung des Transkriptionsfaktors Nrf2 (*Nuclear factor erythroid 2-related factor 2*) und von Hämoxigenase-1 (HO-1). Dadurch wird das körpereigene antioxidante System hochgeregelt, und es kommt zur vermehrten Produktion von Thioredoxin und Glutathion. Dies erklärt das sehr breite Wirkungsspektrum von Wasserstoff, welches darin besteht, reaktive Sauerstoff- und Stickstoffspezies (ROS/RNS) zu eliminieren. Quasi jede ernsthafte Erkrankung wird begleitet von einer Entzündung, bei der oft vermehrt ROS/RNS produziert wird. Diese hochreaktiven Moleküle können dabei Feedbackmechanismen in Gang setzen, die die Entzündung weiter befeuern. Somit liegt die wichtigste Wirkung von Wasserstoff darin, die Belastung durch ROS/RNS zu reduzieren und auf diese Weise entzündliche Prozesse abzumildern. Ferner wirkt sich Wasserstoff positiv auf die Zusammensetzung des Mikrobioms im menschlichen Darm aus. Besprochen werden auch die Darreichungsformen von Wasserstoff, das meist in Form von Wasserstoffangereichertem Wasser getrunken wird. [Anmerkung: In Japan kann dieser praktisch an jedem Kiosk erworben werden, in Europa ist die Beschaffung hingegen eher schwierig.] Wasserstoff wird aber auch in einer Konzentration kleiner als 4 Prozent dem Atemgas bei Operationen beigemischt. Lösungen, in denen zu transplantierende Organe gelagert werden, werden mit Wasserstoff angereicht, sowie auch Blut/Plasma in Dialyseapparaturen.

Yuh Fukai belegt sehr fundiert die fehlende Toxizität von Wasserstoff und diskutiert, warum Wasserstoff nicht ins Geschäftsmodell großer Pharmaunternehmen passt. Aufgelockert wird der Text durch

zahlreiche Boxen, in denen kurzweilig Anekdotisches mitgeteilt wird. Das Kapitel über schweres Wasser passt eigentlich nicht zum Thema und sprengt etwas den Rahmen des Buches. Bei „Molecular Hydrogen for Medicine“ handelt es sich um das bisher einzige populärwissenschaftliche Buch zur therapeutischen Anwendung von Wasserstoff in englischer Sprache. Vergleichbares in deutscher Sprache ist bisher nicht erschienen. Das Buch ist sehr empfehlenswert für Ärzte und Tierärzte, aber auch für Betroffene zahlreicher Erkrankungen, um sich einen Überblick zu verschaffen. Die Sprache ist anspruchsvoll, aber deutlich verständlicher, als die üblicherweise in Fachartikeln verwendete Sprache.

*Kurt Lucas, MPI für Chemie*

**Molecular Hydrogen for Medicine.** Yuh Fukai, Springer, 2020, 179 S. 24,60 €, ISBN: 978-981-15-7156-5 Auch als E-Book erhältlich.

## CITIZEN SCIENCE

### Experimente mit Teebeuteln



Handlungsorientierter Umweltschutz – z. B. möglichst geringe Klimabelastung, Nachhaltigkeit,

bedarfsgerechte und faire Ressourcennutzung sowie Lebensmittelwertschätzung – fangen schon im Kleinen an, oder besser gesagt bei den Kindern und Jugendlichen, die Forschergeist haben, immer schon einmal ein bisschen mehr über Vorgänge in der Natur wissen und auch ihren Beitrag zum Umweltschutz leisten möchten (*Citizen Science*) – noch dazu ganz zeitgemäß, nämlich unter Zuhilfenahme eines GPS-fähigen Smartphones. Im Rahmen des Wissenschaftsjahres 2020/21

(Thema „Bioökonomie“) hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung zusammen mit verschiedenen renommierten Forschungseinrichtungen ein Experimentierkit zur Analyse des Ökosystems Boden entwickelt, das neben viel adressatengerecht aufbereitetem Sachwissen zu den ökologischen Wechselwirkungen unter unseren Füßen vor allem den Forscher/-innen die Möglichkeit gibt, durch „Learning by Doing“ selbstentdeckend zu lernen. Verblüffend das Ausgangsmaterial: Grün- und Rooibostee. Alleine schon der den teilnehmenden Einzelpersonen oder Schulklassen zur Verfügung gestellte Laborkasten sowie die Informationsmaterialien für Lehrkräfte und die jungen Forscher/-innen, auch mit Blick über den Tellerrand, machen die Bodenexperimente zu einem unterrichtlichen Highlight, bei dem auch die methodischen sowie die die Auswertung betreffenden Aspekte ihrerseits nachhaltig wirken dürften: Bestimmung von Bodenarten und -farbe, des pH-Wertes, von Bodenlebewesen sowie die Ermittlung der Durchwurzelung sind möglich. Ein modern gestaltetes Navigationsheft gibt eine gut verständliche Anleitung plus Protokollvorlagen und Aufgaben. Im Aktionskit ist alles drin, was man für die Experimente braucht, von den Teebeuteln über pH-Teststäbchen, Schaufel, einem Gewichtstück und sogar einer Laborwaage bis hin zu Steckschildern – alles zu transportieren in einem schicken Expeditionsrucksack aus Leinen. Einen Einblick in die faszinierende Aktion und weitere Informationen zum kostenlosen Bezug des Experimentierkits gibt es unter: <https://www.expedition-erdreich.de/>

*Christiane Högermann, Osnabrück*

**Expedition Erdreich – mit Teebeuteln den Boden erforschen.** Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2021.

## MIKROBEN VERSTEHEN

## Polyploidie bei Mikroben

**Noch bis vor einigen Jahren galten Prokaryoten als generell monoploide Organismen. Einige polyploide Arten waren zwar schon länger bekannt, wurden aber als Ausnahmen angesehen. Inzwischen finden sich zunehmend Hinweise darauf, dass der Besitz mehrerer Chromosomensätze bei Bakterien und Archaeen evolutionär wiederholt auftrat und heute verbreitet ist. Denn Polyploidie birgt für die Vermehrung und nachhaltige Entwicklung der Mikroben Vorteile.**

Vor Zeiten legte eine theoretische Arbeit dar, dass Rekombination genetischer Information bei sexueller Vermehrung den Genpool stabilisiert und günstige Mutationen schneller vereinigt als asexuelle Vermehrung bei Mikroben mit Mutationen in jeweils getrennten Genomlinien [1]. Eine Schlussfolgerung war, dass sich in der Nachkommenschaft von Prokaryoten Mutationen unabhängig voneinander anreichern und die Diversifizierung einer ursprünglichen Genausstattung nach sich zieht. Dieser Effekt sollte bei Polyploidie noch deutlicher ausfallen, weil die Weitergabe heterogener Genomsätze zunehmend abweichende Nachkommen erzeugt [2]. Demnach dürften stabile polyploide Mikroben eigentlich nicht existieren, und so verwundert es nicht, dass darüber lange Zeit kaum geforscht wurde. Nur, in der Natur kommen sie trotzdem vor und wohl weiter verbreitet als geahnt. Denn inzwischen sind Mikroben aus verschiedenen phylogenetischen Zweigen mit mehreren Genomkopien bekannt, und schon vor über 70 Jahren fand man, dass Zellen von *E. coli* polyploid sein können [3]. Es treten per Definition vier Ploidiegrade auf: neben monoploiden (eine Genomkopie;  $n = 1$ ) auch oligo- ( $n \leq 10$ ), poly- ( $n > 10$ ) und hyperpolyploide ( $n \gg 10$ ) Ausprägungen [2]. Den Rekord hält derzeit das Riesenbakterium *Epulospiscium fishelsoni* mit mehreren  $10^4$  bis einigen  $10^5$  Chromosomenkopien pro Zelle [4].

### Ploidie und Zellgröße

Ein Mikrobenchromosom versorgt offenbar nur ein begrenztes Cytoplasmavolumen, das meist weniger als  $1,5 \mu\text{m}^3$  umfasst und damit höchstens dem Rauminhalt einer kleinen Zelle von *E. coli* entspricht. Ein Grund dafür ist die geringe Reichweite und die dafür benötigte Zeit des Stofftransports durch Diffusion. Größere Mikroben und vor allem Riesenzellen benötigen deshalb entsprechend viele (und in der Zelle verteilte) Genomkopien, um alle Cytoplasmabereiche abzudecken. Die Größe von Mikroben und die Anzahl ihrer Genomsätze, soweit bisher bekannt, korrelieren miteinander [4]. Zu den nachweislich monoploiden Arten gehören neben dem temporär sessilen, gestielten Bakterium *Caulobacter crescentus* auch *Wolinella succinogenes*, eine Mikrobe des Rinderpanpens, einige Cyanobakterien, *Bacillus subtilis* und langsam wachsende Zellen von *E. coli* [5]. Die Liste ist länger, doch sind mehr explizit erhobene Daten nötig. Vermutlich zählen die kleinsten Bakterien wegen ihres minimalen Zellvolumens, das für mehrere DNA-Moleküle kaum Raum bietet, und andere Arten ebenfalls dazu. Monoploidie bedeutet immer auch temporäre Diploidie im Verlauf des Zellteilungszyklus.

### Ploidie und Wachstumsbedingungen

Einen weiteren Zusammenhang mit der Genomzahl stellen Wachstumsbedingungen her. Man beobachtete,

dass in üppigen Nährmedien Zellen von *E. coli* und *Azotobacter vinelandii*, einem in Boden und Wasser lebenden Stickstofffixierer, mehr als 30 bzw. bis zu 80 DNA-Kopien anlegen können. In natürlichen Biotopen ist *Azotobacter* dagegen eher oligoploid [2]. Vermutlich verfügen viele Mikroben über das Potenzial zur Oligo- oder Polyploidie, um sich auf wechselnde ökologische Bedingungen einzustellen und bei reichhaltigem Nährstoffangebot den Stoffwechsel beschleunigen und sich schneller vermehren zu können. So besitzen etliche Haloarchaeen in der Wachstumsphase etwa 13 Chromosomenkopien, in der stationären Phase nur noch sieben [6]. Ähnliches trifft für Methanobakterien und andere Mikroben zu. Halophile Archaeen sammeln bis zu 40 DNA-Kopien an, wenn die Nährlösung reichlich Phosphat enthält. Die Zellen vermehren sich dann sogar in Phosphat-freien Medien. Sie nutzen die Chromosomen als Phosphatquelle und bauen sie bis auf zwei Kopien ab [2]. Die DNA polyploider Zellen dient also als Informations- und potenziell als Materialspeicher, eine Eigenschaft, die monoploiden Arten nicht zur Verfügung steht. Eine besondere Situation gilt für Rhizobien, die sich als Symbionten in Leguminosen von vegetativen Zellen zu Bacteroiden entwickeln, um für die Wirtspflanze Luftstickstoff zu fixieren. Bacteroiden vergrößern ihr Zellvolumen und vervielfältigen ihren Chromosomensatz bis zum 20-Fachen [2]. Hier steuert die symbiotische Interaktion die Entwicklung der Polyploidie.

### Polyploid und trotzdem homogen

Wie steht es nun mit dem Argument, dass polyploide Mikroben über ihre Vermehrung und Ansammlung individueller (rezessiver) Mutationen in eine Kaskade zunehmend diverser Nachkommen zerfallen sollten? Die Überlegung ist überzeugend, nur entwickeln sich die Genomkopien ohne Selektionsdruck nicht auseinander. Grund dafür ist die (bei Eukaryo-

ten schon länger bekannte) *Genkonversion*. Sie bezeichnet die nicht-reziproke Informationsübertragung einer DNA-Sequenz auf eine homologe Sequenz. In Bakterien wird vor allem die *intramolekulare* Genkonversion zwischen homologen Genen eines Chromosoms untersucht; für oligo- und polyploide Mikroben ist die *intermolekulare* Genkonversion zwischen entsprechenden Sequenzpositionen verschiedener Genomkopien bedeutend (Abbildung 1). Denn dieser Mechanismus korrigiert auftretende Mutationen und harmonisiert die Sequenz aller Chromosomenkopien. Experimente mit *Methanococcus maripaludis* zeigten, dass sich künstlich eingebrachte Änderungen in einen Teil des polyploiden Genomsatzes in den Folgegenerationen ausdünnen und wieder durch die Ausgangssequenzen ersetzt werden [2]. So ist auch erklärlich, warum polyploide Mikroben eine geringere Mutationsrate aufweisen als monoploide Arten, und Genomsequenzierungen homogene Ergebnisse liefern [6]. Die einzige bisher bekannte Ausnahme ist das Schwefelbakterium *Achromatium oxaliferum*. Es ist heterozygot und enthält mit einigen hundert Chromosomenkopien die Information einer ganzen genetisch variierenden Gemeinschaft [7]. Der intermolekulare Reparaturmechanismus bietet oligo- und polyploiden Zellen jedoch enorme Vorteile.

### Ploidie und Überlebensfähigkeit

*Deinococcus radiodurans* ist ein gegen Trockenstress und Bestrahlung resistentes Bakterium und für seine Fähigkeit bekannt, Läsionen und Fragmentierungen der DNA zu korrigieren. Wesentlich dafür ist seine Oligoploidie mit 4–10 DNA-Kopien. Nur deshalb ist das Bakterium in der Lage, multiple Doppelstrangbrüche zu reparieren; dies ist monoploiden Mikroben versagt.

Extrem halophile Archaeen wurden wiederholt aus flüssigkeitsgefüllten, hermetisch abgeschlossenen Hohlräumen in Salzkristallen, die bis zu 40 Millionen Jahre alt waren, iso-

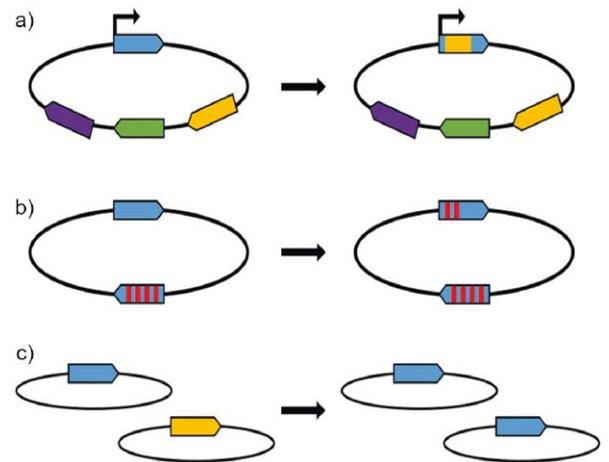
liert und rekultiviert. Die halophilen Archaeen sind polyploid und waren mittels Genkonversion offenbar in der Lage, ihre Genomkopien stabil und homogen zu erhalten [6]. Oligo- und Polyploidie steigern also die Überlebensfähigkeit von Mikroben in desaströsen Umweltbedingungen und über geologische Zeitspannen. Die Erhaltung von Funktion und Nachhaltigkeit hat Wolfgang Heckl, Direktor des Deutschen Museums in München, treffend – und allgemeiner gültig als beabsichtigt – beschrieben: „Reparieren ist ein Zugang zu Fähigkeiten, die man im Leben braucht.“ [8].

### Polyploide Arten verfälschen Zellzählungen

Eine vor kurzem erkannte Konsequenz mehrfacher Genomkopien in Zellen ist, dass der Nachweis einer Indikatorgenesequenz zur Erfassung von Arten und ihren Häufigkeiten in natürlichen Proben zu quantitativ verzerrten Schlüssen führt [9]. Befindet sich z. B. eine oligoploide Art *P* mit neun Genomkopien in einer Probe mit neun anderen, jeweils gleich stark vertretenen monoploiden Arten ( $M_{1-9}$ ), so scheint *P* die Hälfte aller Zellen auszumachen, trägt aber wie jede der Arten  $M_{1-9}$  nur 10 Prozent zur Gesamtpopulation bei. Solche Analyseirrtümer verfälschen die mikrobielle Zusammensetzung und beeinträchtigen die biologische Bewertung untersuchter Ökosysteme. Nebenbei bewirkt der Effekt, abhängig von der dabei angewandten Methodik, auch eine Überschätzung der absoluten Zell- bzw. Artenzahl auf unserem Globus. Polyploidie hat erkennbar multiple Effekte.

### Literatur

- [1] Muller (1964). The relation of recombination to mutational advance. *Mutation Res.* 1, 2–9.
- [2] J. Soppa (2014). Polyploidy in archaea and bacteria: About desiccation resistance, giant cell size, long-term survival, enforcement by a eukaryotic host and additional aspects. *J. Mol. Microbiol. Biotechnol.* 24, 409–419.



**ABB. 1** Schematische Darstellung von Varianten der Genkonversion. a) Immunologische Variation: Der Pfeil bezeichnet den Promotor des exprimierten Gens, die verschiedenen Farben bedeuten homologe, aber nicht identische Gene. b) Evolution zweier Mitglieder einer Genfamilie. Die roten Streifen deuten einzelne Unterschiede von Nukleotiden an. c) Angleichung homologer aber nicht völlig identischer Gene an gleichen Orten verschiedener Genomkopien in oligo- und polyploiden Mikroben. Verändert nach [10] gemäß der Creative Commons Attribution License (CC BY).

- [3] A. Buzzati-Traverso et al. (1948). Polyploidy in bacteria? *Nature* 162, 295.
- [4] H. Engelhardt (2021). Mikrobielle Zwerge und Riesen. *Biologie in unserer Zeit* 51, 387–388.
- [5] V. Pecoraro et al. (2011). Quantification of ploidy in proteobacteria revealed the existence of monoploid, (mero-) oligoploid and polyploid species. *PlosOne* 6, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0016392>
- [6] K. Ludt, J. Soppa (2019). Polyploidy in halophilic archaea: regulation, evolutionary advances, and gene conversion. *Biochem. Soc. Trans.* 47, 933–944.
- [7] D. Ionescu et al. (2017). Community-like genome in single cells of the sulfur bacterium *Achromatium oxaliferum*. *Nat. Commun.* 8, <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00342-9>
- [8] J. Frisse (2020). Reparieren ist ein Zugang zu Fähigkeiten, die man im Leben braucht. (Interview mit W. Heckl) *DIE ZEIT*, 26.5.2020.
- [9] J. Soppa (2017). Polyploidy and community structure. *Nat. Microbiol.* 2, <https://doi.org/10.1038/nmicrobiol.2016.261>
- [10] D. Wasser et al. (2021). Characterization of non-selected intermolecular gene conversion in the polyploid haloarchaeon *Haloferax volcanii*. *Front. Microbiol.* 12, <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.680854>

Harald Engelhardt,  
Martinsried

## AUSSERSCHULISCHE LERNORTE

## Naturkundemuseum Berlin – Gemeinsam für Natur

*Wir leben in einer Welt, in der nur 1 bis 10 Prozent der existierenden Arten auf der Erde wirklich bekannt sind. Ein Teil dieses Naturerbes findet sich in naturkundlichen Museen. Allein im Museum für Naturkunde Berlin (MfN) wurde über mehr als 250 Jahre hinweg eine Sammlung zur Bio- und Geodiversität angelegt. Darunter sind zum Beispiel der 2020 als ausgestorben erklärte Chinesische Löffelstör, Minerale Alexander von Humboldts oder Material von großen Expeditionen wie der Valdivia-Tiefseeexpedition. Auch heute noch wächst die Sammlung weiter, denn das Museum ist nicht einfach nur ein Museum, sondern hier wird geforscht – mit der Sammlung als globaler Forschungsinfrastruktur.*

Das Museum für Naturkunde (MfN) ist ein Forschungsmuseum der Leibniz-Gemeinschaft mit internationaler Ausstrahlung. Teams mit Wissenschaftler/-innen aus unterschiedlichen Disziplinen vertiefen ihre Forschung an den über 30 Millionen Sammlungsobjekten zur Entwicklung der Erde und des Lebens. Die Themen reichen von der Entwicklung des Sonnensystems über die Mechanismen der Evolution bis zur Vielfalt des Lebens auf der Erde. Darüber hinaus wird die wissenschaftshistorische, kulturelle und künstlerische Bedeutung der Objekte erforscht.

Das Fenster der Forschung ist die Ausstellung. Besonders augen-

fällig sind die Biodiversitätswand (Abbildung 1) mit ca. 3000 Objekten sowie die Dinosaurierskelette (Abbildung 2). *Giraffatitan brancai* schaut aus 13 m Höhe herab und erlangte so einen Eintrag in das Guinnessbuch der Rekorde als höchstes aufgestelltes Dinosaurierskelett der Welt. Spektakulär ist auch der im Original ausgestellte Urvogel *Archaeopteryx lithographica*, durch dessen Fund Charles Darwin seine Evolutionstheorie bestätigen konnte. Spannend ist die Präparationsausstellung mit dem berühmten Eisbären „Knut“; zeigt sie doch auf anschauliche Weise die vielfältigen Techniken der Erhaltungsmöglichkeiten.

Natur sammeln, erforschen, kommunizieren – dies vermitteln die modernen, wissenschaftsbasierten Ausstellungen und der öffentlich zugängliche Teil der Forschungs-Nass-Sammlung. Hier stehen 275 000 Gläser mit in Alkohol konservierten Tieren für Forschende und Besuchende bereit.

### Möglichkeit zur Partizipation

Naturkundemuseen sind Forschungseinrichtungen und Kommunikationszentren. Durch die Möglichkeiten digitaler Technik können die Objekte und das Wissen darüber allen Menschen zugänglich gemacht und die Voraussetzungen für Dialog und Partizipation geschaffen werden. Das MfN ist Zentrum bürgerwissenschaftlicher Forschung (*Citizen Science*). Der „Forschungsfall Nachtigall“ rief beispielsweise Bürger/-innen auf, die Gesangsaktivitäten der Nachtigallen aufzuzeichnen; auf Berliner Dächern werden Mikrometeorite gesucht und anschließend erforscht.

Einen ungewöhnlichen Weg beschritt das MfN mit der App „Naturblick“. Ziel ist es, insbesondere junge Erwachsene wieder mehr mit Natur zu verbinden. Die App lebt von dem Feedback seiner Nutzer/-innen und wird kontinuierlich vom MfN-Entwicklerteam technisch und inhaltlich vorangebracht.



**ABB. 1** Die Biodiversitätswand mit rund 3000 Objekten ist beliebter Programmpunkt von Führungen durch das Museum. Alle Fotos Hwa Ja Götz (MfN).



**ABB. 2** Original des fossilen Schädels des *Tyrannosaurus rex* Tristan Otto.



**ABB. 3** Schulklassen können im Mikroskopierzentrum des Museums biologische Arbeitsweisen erlernen.

Mit #fürNatur digital ist das Museum online auf vielen Kanälen und mit vielen Angeboten erlebbar, um für Natur zu begeistern und alle Interessierten am Forschungsgeschehen teilhaben zu lassen.

Das MfN ist ein anerkannter außerschulischer Lernort, der sich aufgrund seines Charakters als Forschungsinstitution durch ein hohes Maß an Authentizität auszeichnet. Als nicht-formaler Lern- und Erfahrungsort bietet das MfN eine Vielfalt an Bildungsprogrammen für Besucher/-innen jeden Alters entlang der gesamten Bildungskette. Neben klassischen Führungen durch die Ausstellungen können Kinder (Abbildung 1), Jugendliche und Erwachsene an Workshops zu verschiedenen Themen wie z. B. Evolution des Menschen, Artenschutz oder Biomimikry teilnehmen, die in den 2018 errichteten Bildungsräumen stattfinden. Darüber hinaus können Schulklassen im Mikroskopierzentrum (Abbildung 3), welches ein anerkanntes Schülerlabor im Netzwerk GenaU ist, biologische Arbeitsweisen erlernen und anwenden. Die Bildungskonzepte sind so aufgebaut, dass die naturwissenschaftliche Grundbildung (*Scientific Literacy*) der Teilnehmenden gefördert wird. Dabei liegt der Fokus zumeist auf dem forschend-entdeckenden Lernen und leistet einen Beitrag zum Wissen-

schaftsverständnis. Zudem werden unterschiedliche Disziplinen und Zugänge miteinander verbunden: Natur wird künstlerisch erlebt und dargestellt, z. B. in Form von Zeichnungen, Poesie, Theater und Schreibwerkstätten. Die Bildungsangebote finden aber nicht nur im Museum, sondern auch direkt in der Natur statt. Auf Exkursionen in die Berliner Stadtnatur und in ein nahegelegenes Naturschutzgebiet liegt der Fokus auf Naturerleben und Naturerfahrungen.

### Zukunft Mensch

Es zählt also zum Selbstverständnis eines solch vielschichtigen Museums, dass es sich auch als Ort begreift, an dem über gesellschaftlich drängende Fragen debattiert wird. Die Geburt von Zwillingen im Jahr 2018, deren Erbgut gentechnisch verändert worden war, ist ein eindrückliches Beispiel dafür, dass große Fragen der Wissenschaft nicht exklusiv in den Elfenbeintürmen der Academia verhandelt werden können. Schließlich geht es bei sogenannten Keimbahneingriffen um die Frage, ob der Mensch seine Evolution selbst in die Hand nimmt. Derartige Eingriffe in die menschliche Natur berühren also unmittelbar die Frage, in welcher Welt wir leben (wollen). Um über sie nachzudenken, bietet das Museum einen so authentischen wie inspirie-

renden Rahmen. Das Forschungsprojekt „ZukunftMensch“ testete hier verschiedene Formate, um mit vielen Menschen ins Gespräch zu kommen. Für einige Wochen sahen Besucher im Experimentierfeld etwa einen Mann in einem arrangierten Video zu ihnen sprechen, der von seinem Eingriff in die Keimbahn der Embryonen berichtete. He Jiankui, so der Name des Forschers, endete damit, dass er die Betrachtenden einlud, ihm oder den Babys zu schreiben. Diese Einladung griff „ZukunftMensch“ auf und bat die Museumsbesuchenden ihrerseits, wahlweise He, den Kindern oder dem Vorsitzenden des Deutschen Ethikrats eine Postkarte zu schreiben. Die große Resonanz einerseits, noch viel mehr aber die Vielzahl an Themen, Perspektiven und Haltungen andererseits, sprechen für die Vielfalt zugrundeliegender Wertevorstellungen. Diese zu hören und Strukturierungsangebote zu bieten ist Aufgabe einer Wissenschaft, die vom gegenseitigen Lernen profitiert.

*Dr. Gesine Steiner,  
Dr. Alexandra Moormann,  
Dr. Julia Diekämper,  
Naturkundemuseum Berlin*

### BESUCHERINFORMATION

#### Öffnungszeiten:

Montags geschlossen.

Dienstag bis Freitag: 9:30 bis 18:00 Uhr

Samstag, Sonntag und feiertags: 10:00 bis 18:00 Uhr

Der Eintritt ist nur mit Online-Zeitfenstertickets möglich, die über die Homepage gebucht werden können.

#### Eintritt:

Erwachsene: 8,00 Euro

Ermäßig: 5,00 Euro

#### Allgemeine Anfragen und Informationen:

[www.museumfuernaturkunde.berlin](http://www.museumfuernaturkunde.berlin)

Tel: (030) 889140-8591

E-Mail: [info@mfn.berlin](mailto:info@mfn.berlin)

#### Informationen zu museumspädagogischen Angeboten:

Tel: (030) 889140-8550

E-Mail: [besucherservice@mfn.berlin](mailto:besucherservice@mfn.berlin)

Eine Zusammenstellung der digitalen Angebote zur Vor- und Nachbereitung des Besuches finden Sie hier: <https://www.museumfuernaturkunde.berlin/de/fuernatur-digital>

## PARTNER DES MENSCHEN

## Die Forelle

**Nicht nur Lachse und Aale nehmen die Beschwerden der Wanderungen vom Süßwasser ins Salzwasser auf sich, auch Forellen nehmen solche katadrome Wanderungen in Kauf, wenn sie die Gelegenheit dazu haben. Die phänotypischen Unterschiede der diversen „Forellenarten“ sind so stark ausgeprägt, dass die verschiedenen Formen verschiedenen Arten zugeordnet werden.**

Forellen laichen zwischen Oktober und Dezember in rasch dahin strömenden Oberläufen von kalten Gebirgsbächen, fortwährend verwirbelt von kleineren oder größeren Wasserstürzen. Auf den ersten Blick ein unwirtlicher Lebensraum. Doch Wassertemperaturen, die kaum 10 °C übersteigen, und die unablässig sprudelnden Strömungen garantieren eine optimale Sauerstoffsättigung solch eines Habitats, für das der Freiburger Forstzoologe Robert Lauterborn zu Beginn des 20. Jahrhunderts den Terminus „Forellenregion“ geprägt hat.

Gemäß den Untersuchungen der Fischereiforschungsstelle von Baden-Württemberg legen größere Forellen Strecken von 100 oder mehr Kilometern zurück, um „ihre“ Laichregionen zu erreichen. Kleinere Forellen beschränken ihre Laichwanderungen auf einige hundert Meter oder ein paar Kilometer – leider gibt es keine Angaben darüber, inwiefern sich große von kleinen Forellen unterscheiden.

Hingegen sind die Voraussetzungen für erfolgreiche Laichwanderungen hinlänglich bekannt. Neben unverbauten Gewässerläufen begünstigen 20 bis 30 Zentimeter tiefe Gewässerabschnitte – das entspricht in etwa der doppelten bis dreifachen Körperhöhe – das Bewältigen der Wanderrouen. Aber auch bis zu zwei Meter lange Strecken, deren Tiefe gerade einmal der Leibeshöhe gleichkommt, können überwunden werden. Selbst Abstürze von 80 Zentimetern werden übersprungen, soweit der Trog unter dem Sturz mindestens ein Meter eingesenkt ist.

In einem schnell dahin fließenden Gebirgsbach könnten aufgewirbelter Sand, springende Steinchen und kullernde Kiesel ein Hinweis auf die kraftvollen Schwanzschläge eines Forellenweibchens sein, das im Begriff ist, eine Laichgrube zu formen. Während sich das Weibchen – der Rogner – um die Fertigstellung des Laichplatzes kümmert, verharrt das Männchen – der Milchener – hinter dem Rogner. Sobald die Grube vollendet ist, rückt der Milchener nach und befruchtet die goldgelben Eier, die vom heftig zuckenden Rogner hervorgebracht werden.

### DIE FORELLE

*In einem Bächlein helle,  
Da schoss in froher Eil'  
Die launische Forelle  
Vorüber wie ein Pfeil.  
Ich stand an dem Gestade  
Und sah in süßer Ruh'  
Des munter'n Fischleins Bade  
Im klaren Bächlein zu.*

*Text: Christian Friedrich Daniel Schubart. Strophen 1–3 vertont von Franz Schubert.*

Die besamten Eier werden in das Lückensystem des steinigen Untergrunds gespült, wo sie zunächst verbleiben. Die Korngrößen um die Laichgrube wurden vom Weibchen so gewählt, dass die Brut bestmöglich mit Sauerstoff versorgt wird. Ein ungewöhnliches Verhalten unter Fischen, werben doch meist die Fischmännchen mit ihren teils kunstvoll angelegten Laichplätzen um paarungsbereite Weibchen. Die befruchteten Eier entwi-

ckeln sich im Interstitial zur Dottersackbrut. Die frischgeschlüpfte Brut arbeitet sich tiefer in den steinigen Untergrund und verweilt darin, bis ihre Dottersäcke aufgezehrt sind. Anschließend kehren die heranwachsenden Forellen wieder auf die Gewässersohle zurück und versuchen sich als Jäger. Zuweilen fallen junge Forellen über sehr stattliche Beutetiere her, welche sie keinesfalls hinunterschlingen können. In der Regel bedeutet dies sowohl für den Gejagten als auch für den Jäger den Tod.

### Forelle ist nicht gleich Forelle oder doch?

Kategorien sind für Biologen attraktiv, weil sie es möglich machen, die Tier- und Pflanzenwelt in Arten und Gattungen einzuteilen und in höhere Taxa eines natürlichen Systems einzugliedern. Freilich sorgen sich Tier- und Pflanzenarten nicht um die Begrifflichkeiten von taxonomisch tätigen Biologen. Diese Diskrepanz wird auch in Brehms Tierleben von 1928 dargelegt, in dem es heißt, dass „See- und Meerforelle und mit ihnen als Dritte im Bunde die Bachforelle nur Abarten ein und derselben Stammform (sind), wobei unentschieden bleibt, ob die Bachforelle oder die Meerforelle diese Stammform ist.“

Lakonisch oder aus der Not geboren wird in der Exkursionsfauna Stresemanns die Forelle *Salmo trutta* L. in drei Formen unterteilt: Danach gilt die Meerforelle *Salmo trutta* forma *trutta* L. (Abbildung 1) als Stammform, die Seeforelle *Salmo trutta* forma *lacustris* L. (Abbildung 2) als Form der Gebirgsseen und die Bachforelle *Salmo trutta* forma *fario* L. (Abbildung 3) als Form der fließenden Gewässer. Mithin liefert der tschechische Zoologe und Ichthyologe Jiří Čihař eine zwanglose ökotypologische Beschreibung der heimischen Forellenfauna. Seinen Forschungen zufolge bestimmen vielmehr die machbaren Wandlungsmöglichkeiten die ontogenetische Entwicklung der hiesigen Forellen.

Notgedrungen verwandeln sich Forellen, die keine Gelegenheit hatten, von ihren Geburtsplätzen im Süßwasser ins Meer zu gelangen, in Bachforellen, während diejenigen, die die katadrome Wanderung gemeistert haben, zu 120 Zentimetern messenden und 40 Kilogramm wiegenden mächtigen Fischen heranwachsen. Auch die Form *Salmo trutta* forma *lacustris* L. schert sich nicht um taxonomische Eitelkeiten: Jene geschlüpften Tiere, die in fließenden Gewässern verweilen, werden zu Bachforellen, solche, die in höher gelegene Stauseen emporsteigen, entwickeln sich zu Seeforellen, die in Länge und Gewicht ihren maritimen Verwandten kaum nachstehen.

Offensichtlich beschreiben die gebräuchlichen Namen der heimischen Forellenpopulationen weder Arten noch Unterarten, sondern lediglich ökologische Typen einer einzigen Art und stellen somit umweltbedingte Modifikationen dar. In diesem Sinne könnte der bekannteste Speisefisch im deutschsprachigen Raum im jungen Forschungsgebiet der Epigenetik noch für viel Furore sorgen, zumal Forellen offensichtlich einen tetraploiden Chromosomensatz besitzen.

### Ideen zur Verwandtschaft

Proben mitochondrialer DNA, die weltweit von Salmoniden gesammelt wurden, belegten die nahe Verwandtschaft der Regenbogenforelle, die ursprünglich nur in der Neuen Welt heimisch war, mit pazifischen Lachsen. Daher wurde die bis Anfang der 1980er Jahre gültige taxonomische Bezeichnung *Salmo gairdneri iredeus* GIBBONS zugunsten *Oncorhynchus mykiss* WALBAUM ausgetauscht, wobei das Artepitheton „mykiss“ bestimmt eine gründliche Recherche wert wäre.

Qualitätsbegriffe sind häufig Euphemismen. Die Lachsforelle, die in Brehms Tierleben noch als Synonym für die Meerforelle gebräuchlich war, ist heute nur noch eine Handelsbezeichnung für kräftig abgewachsene Forellen, die mit Farbstoffen gemä-

tet wurden und daher auf dem Eisbett einer Fischtheke ähnlich wie Lachsfleisch anmuten. Gewicht und Farbe erinnern an Lachsfleisch, daher bot es sich wohl an, den Verwandten aus dem Meerwasser als Namenspaten zu verwenden.

Reichert leitete 1837 in seiner Promotionsschrift die menschlichen Gehörknöchelchen vom Hyamandularbogen und den ersten beiden Kiemenbögen der Fische ab. Der Begriff Homologie war damals noch nicht gebräuchlich. Während des Schreibens hat sich der Autor vorgenommen, vor dem nächsten Verpeisen einer Forelle einen Blick in „Kükenthals Leitfaden für das zoologische Praktikum“ zu werfen, um nach dem Hyamandibularbogen und den beiden Kiemenbögen zu suchen, aus denen letztlich die wunderbare Anordnung von Hammer, Amboss und Steigbügel hervorgegangen ist.

### Zum Weiterlesen

- [1] J. Čihář (1989). Süßwasserfische. Lingen Verlag, Köln.
- [2] W. Koch et al. (1976). Fischzucht. Ein Lehrbuch für Züchter und Teichwirte. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.
- [3] G. Köck (1995). Die Systematik im Wandel der Zeit am Beispiel der Salmoniden. Österreichs Fischerei, Jg. 48, 188–192.
- [4] N. Shubin (2011). Der Fisch in uns. S. Fischer Verlag GmbH, 4. Aufl.
- [5] [https://www.biologie-seite.de/Biologie/Karl\\_Bogislaus\\_Reichert](https://www.biologie-seite.de/Biologie/Karl_Bogislaus_Reichert), abgerufen am 21.12.2020.
- [6] <https://lazbw.landwirtschaft-bw.de/pb/,Lde/Startseite/Themen/Fischereiforschungsstelle>, abgerufen am 30.12.2020.



ABB. 1 Meerforellen, unten das Männchen, oben das Weibchen.



ABB. 2 Seeforelle, oben das Männchen, unten das Weibchen.

Thomas Volker Müller, Stuttgart



ABB. 3 Bachforellen, erkennbar an den roten Punkten in Höhe des Seitenlinienorgans bei dem Männchen und den beiden Jungtieren.



## MANAGEMENT-FALLSTRICKE, TEIL 11

### Der IKEA-Effekt

*Fehlentscheidungen sind menschlich. Wir aber lassen in unserer Serie „Management-Fallstricke“ die Tiere zu Wort kommen. In Form von Fabeln vermittelt unsere Autorin Andrea Hauk in anschaulicher Weise typische Denkfehler, die auf allen Managementebenen zu Hause sind. Vielleicht sind Sie ja selbst auch schon einmal in die eine oder andere Falle getappt?*

Lotti Otter stapelte die verbleibenden Forellen in den Holzkisten vor seinem Verkaufsstand und hoffte auf eine kühle Nacht. Stinkenden Fisch konnte er jetzt nicht auch noch gebrauchen. Seine Einkünfte reichten ihm auch so kaum zum Leben. Dabei machte er doch wirklich alles für seine Kundschaft! Nicht nur, dass er jeden einzelnen Kunden in einem kleinen Holzkarren bis vor den Weiher zog, falls sie es wünschten, nein – sogar fix und fertig verpackte Ware bot er ihnen an. Geputzt und mundgerecht geschnitten. Nicht einmal selbst ausnehmen mussten die Kunden den Fisch. Wer wollte, bekam die Ware sogar auf einem Silbertablett präsentiert. Was sonst sollte er denn noch tun? Er musste seinen Verkauf ankurbeln. Doch wie sollte er nur seine Verkaufszahlen steigern? Er war ratlos.

Wütend wegen des schlechten Erlöses trat er gegen den Holzstapel. Es krachte und schepperte, und vor Schmerz zuckte er zusammen. Da hatte er es wohl etwas übertrieben. Umständlich zog er sein Bein wieder zu sich heran. „Auch das noch“,

ärgerte er sich. Ein verletzter Knöchel war das letzte, was er jetzt gebrauchen konnte.

Die nächsten Tage saß Lotti Otter mit schlechter Laune und hängenden Schnurrhaaren vor seinem Verkaufsstand. Einige Käufer kamen vorbei und interessierten sich für die Forellen. Ab und zu kaufte jemand. Doch sein Problem war, dass er nicht für Nachschub sorgen konnte. Lotti entschuldigte sich vielmals, dass er ihnen keinen fangfrischen Fisch anbieten konnte und sah schon das Damokles-Schwert über seiner Existenz kreisen. Seine sonst so lustigen, braunen Augen waren ganz matt vor Sorge. Lilo Luchs betrachtete die goldenen Angelhaken in seiner Auslage, die neben dem Rest der bereits in Portionsgröße abgepackten Ware lagen. „Könnte ich es auch einmal probieren?“ Lotti Otter schmunzelte in sich hinein und wunderte sich. Warum wollte sie nicht einfach die bereits abgepackte Ware nehmen? „Na sicher“, entgegnete Lotti Otter und reichte Lilo den Haken. Diese ging zum Weiher und kam mit einem kleinen Fischexemplar wieder zu-

rück. Ihre dünnen Beinchen waren dabei ganz nass und matschig geworden. Mitleidig betrachtete Lotti Otter das dreckige Wesen. Gerade wollte er sagen, dass er ihr aus Kulanz das kleine Fischchen schenken würde, da legte Lilo Luchs einen großen Schein auf den Tresen. „Das hat großen Spaß gemacht“, sagte sie, wickelte ihren eigens gefangenen Fisch in Papier ein und verabschiedete sich freundlich. Lotti Otter war baff. Als er am nächsten Tag eine ganz ähnliche Situation erlebte, wollte er es wissen und änderte den Schriftzug auf der Tafel vor seinem Verkaufsstand. „Jetzt neu! Fische zum Selberfangen“, schrieb er in großen Lettern darauf. Ihm war es fast schon etwas peinlich, aber er hatte sowieso keine andere Wahl. Schließlich konnte er mit seinem verletzten Bein nicht für Nachschub sorgen.

Der erste Kunde kam und nahm das Angebot sofort wahr. Mit einem breiten Lächeln und verschmutzten Pfoten wackelte der Dackel mit dem selbst gefangenen Fisch davon. Lotti Otter konnte es fast nicht glauben: Immer mehr Kunden wollten dieses Abenteuer ausprobieren. Und nicht nur das – sie waren sogar bereit, viel mehr für einen Fisch zu bezahlen, als sie es jemals zuvor getan hatten!

Lotti Otter lehnte sich genüsslich in seinem Stuhl zurück und legte provokativ das verletzte Bein auf einen kleinen Hocker vor sich. „Wenn ich gewusst hätte, dass den Kunden einfach nur die Mitarbeit fehlt, hätte ich das schon viel früher gemacht“, sinnierte er. Dann begannen seine großen, runden, braunen Augen wieder zu leuchten: „Und nach der Saison biete ich Ferien am Forellenteich an, mit der Möglichkeit den Forellenteich zu säubern“, formulierte er seine neue Geschäftsidee.

**Und die Moral von der Geschicht': Ein Produkt ein Vielfaches an Wert gewinnt, wenn der Nutzer zu helfen beginnt.**

*Ihre Andrea Hauk,  
andrea.hauk@gmx.de*

#### FAKTENBOX

*Dass es sich nicht lohnt, alles auf dem Silbertablett zu präsentieren, liegt am sogenannten IKEA-Effekt. Dieser besagt, dass Menschen diejenigen Produkte mehr wertschätzen, die sie selbst hergestellt haben, bei deren Herstellung sie beteiligt waren oder ein Mitspracherecht hatten. Obwohl es viel leichter wäre ein bereits fertiges Produkt zu kaufen: Durch das aktive Mitwirken steigt die subjektive Wertschätzung der jeweiligen Produkte.*

*Unternehmen wissen diesen Effekt zu nutzen, indem sie ihre Kunden in das Produktdesign und die Produktentwicklung mit einbeziehen. Dies hat einen doppelt positiven Effekt, denn neben der erhöhten Kundenbindung lassen sich aus dem Kundenfeedback auch zahlreiche weitere Erkenntnisse für Marketing und Management gewinnen. Der IKEA-Effekt lässt sich auch in der Mitarbeiterführung nutzen: Erhöht sich der Eigenanteil des Mitarbeiters am Ergebnis, so steigt der Bezug dazu. Dies empfiehlt sich beispielsweise bei Veränderungsprozessen. Das Einholen und Berücksichtigen von Meinungen der Mitarbeiter führt unter anderem dazu, dass die Mitarbeiter anschließend motivierter und engagierter hinter den neuen Prozessen stehen, denn sie haben sich ja schließlich aktiv an der Umstrukturierung beteiligt.*

## RÜCKBLICK

- 3/21 *Fast Food macht den Embryo krank*  
 3/21 *Edmonds Urzeit*  
 3/21 *Das Potenzial der mRNA-Technologie*  
 3/21 *Das Navigationssystem der Vögel – Teil 2*  
 3/21 *Ökosystem Haus*  
 3/21 *Giftige Nahrungspflanzen*  
 3/21 *Maritime Funktionsmorphologie*
- 4/21 *Schwarmintelligenz*  
 4/21 *Mehr Nachhaltigkeit durch Genomeditierung*  
 4/21 *Die Methanbildung bescherte revolutionäre Entdeckungen*  
 4/21 *Spannende Insektenvielfalt im Totholz*  
 4/21 *Terra Preta – Fakten und Mythen*  
 4/21 *Eine neue Ära in der funktionellen Genetik*  
 4/21 *Alanins Wunderlampe*

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen und dgl. in dieser Zeitschrift berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Namen ohne weiteres von jedermann benutzt werden dürfen. Vielmehr handelt es sich häufig um gesetzlich geschützte eingetragene Warenzeichen, auch wenn sie nicht eigens als solche gekennzeichnet sind. – **Alle Rechte vorbehalten**, insbesondere die der Übersetzung in fremde Sprachen. Kein Teil dieser Zeitschrift darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikrofilm oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Nur für den persönlichen und sonstigen eigenen Gebrauch sowie für nicht kommerzielle Zwecke dürfen von einzelnen Beiträgern oder Teilen von ihnen einzelne Vervielfältigungsstücke hergestellt werden. Der Inhalt dieses Heftes wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber, Redaktion und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

## BiuZ 2/2022 erscheint im Mai 2022

**Biologie in unserer Zeit**  
finden Sie im Internet unter  
[www.biuZ.de](http://www.biuZ.de)

Hat Ihnen dieses Heft gefallen, aber Sie sind noch kein VBIO-Mitglied?

Die Biuz gibt es exklusiv für VBIO-Mitglieder.  
Einfach beitreten unter [www.vbio.de/beitritt](http://www.vbio.de/beitritt)  
und viermal im Jahr die Lektüre genießen!



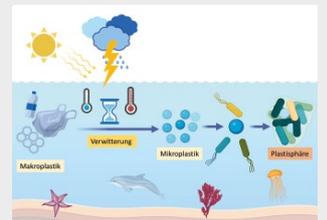
## IM NÄCHSTEN HEFT

**MikroCT in der Biologie**

Die mikroskopische Computertomographie ist ein bildgebendes Verfahren zur hochauflösenden dreidimensionalen Visualisierung und quantitativen Analyse von Untersuchungsobjekten. Aus der biologischen und biomedizinischen Grundlagenforschung ist sie heute nicht mehr wegzudenken. Unser Artikel beleuchtet ihre technischen Grundprinzipien und Anwendungsgebiete.

**Bakterien als Plastikmüllabfuhr**

Plastikverschmutzung in der Umwelt stellt eine bedeutende globale Herausforderung dar. Manche Mikroorganismen sind in der Lage, einige der bekanntesten synthetischen Polymere abzubauen. Damit könnten sie das Recycling von Kunststoffen verbessern und Umweltverschmutzungen vermeiden helfen.

**Der Steinschmätzer – ein Charaktervogel karger Landschaften**

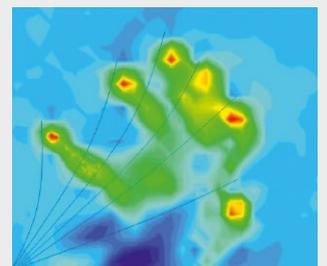
In Deutschland ist der Steinschmätzer vom Aussterben bedroht. Zu seinen letzten Rückzugsgebieten zählen ehemalige Truppenübungsplätze und Bergbaufolgelandschaften. In Brandenburg profitiert er von gezielten Schutzmaßnahmen und präsentiert in manchen Heidegebieten noch sein auffälliges Verhalten an steinigen Brutplätzen.

**Monogamie bei Kupferrotten Springaffen**

Paarleben ist bei Primaten deutlich häufiger als bei anderen Säugetieren. Gleichzeitig ist über die Mechanismen der Paarbeziehungen und darüber, ob Paarleben mit genetischer Monogamie einhergeht, aus Untersuchungen im natürlichen Lebensraum kaum etwas bekannt. Wir präsentieren erste Ergebnisse einer Freilandstudie.

**Form und Bedeutung von Flügelspitzen**

In der Natur begegnet man den unterschiedlichsten Flügelformen. Ihre spezielle Konfiguration kann zum Beispiel Vorteile bei der Mobilität und im Energieverbrauch mit sich bringen. Der hervorstechende Unterschied besteht in der Ausprägung der Schlankheit des Flügels sowie der Flügelspitzen.



# Online Karriere-Event

## Termine

- 23. Februar 2022
- 01. September 2022
- 30. Juni 2022
- 08. Dezember 2022



Live-Vorträge ▪ Workshops  
Karriereberatung ▪ Top-Arbeitgeber im Videocall

**Jetzt kostenfrei anmelden!**

[www.jobvector.de/karrieremesse](http://www.jobvector.de/karrieremesse)

